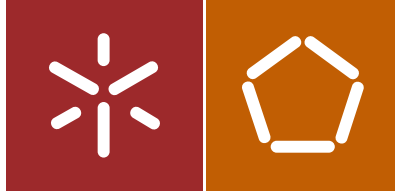




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Gomes

Desenvolvimento e Produção de Filamentos
para Utilização em Impressoras 3D



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Gomes

Desenvolvimento e Produção de Filamentos para Utilização em Impressoras 3D

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Olga Machado de Sousa Carneiro
Professor Alexandre Ferreira da Silva

Outubro de 2014

DECLARAÇÃO

Nome: Rui Gomes

Endereço eletrónico: a30136@alunos.uminho.pt

Telefone: 931166580

Número do bilhete de identidade: 11962128

Título da dissertação: Desenvolvimento e Produção de Filamentos para Utilização em Impressoras 3D

Orientadores: Olga Machado de Sousa Carneiro; Alexandre Ferreira da Silva

Ano de conclusão: 2014

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o contributo de algumas pessoas, às quais gostaria de expressar os meus agradecimentos.

Aos meus orientadores, os professores Olga Carneiro e Alexandre Silva, que sempre se mostraram disponíveis para ajudar e prestaram apoio nas várias etapas do trabalho efetuado.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros, que me prestaram auxílio no uso dos diversos equipamentos, especialmente o técnico João Paulo Peixoto cujo apoio na extrusão foi imprescindível.

Às várias pessoas do Departamento de Engenharia de Polímeros que partilharam comigo espaços e tempo, partilhando conhecimentos e ajudando das mais diversas formas.

À minha família e amigos, por todas as palavras de incentivo no decorrer do trabalho e durante o meu percurso no MIEP.

RESUMO

Das várias técnicas existentes de manufatura aditiva, AM (Additive Manufacturing), a técnica de modelação por deposição de filamento, FDM (Fused Deposition Modeling), começou só muito recentemente a ser vista como uma potencial técnica de manufatura de produtos. No entanto, a gama de filamentos comercialmente disponíveis para utilização neste tipo de equipamentos é limitada e onerosa e os equipamentos continuam a ser essencialmente utilizados na produção de protótipos. Assim, nem os materiais, nem o processo, foram estudados de forma sistemática no sentido de produzir componentes funcionais, com resistência mecânica adequada, ou no sentido de conseguir tempos/custos de produção competitivos para pequenas/médias séries de produção, respetivamente.

Os objetivos desta tese são o estudo da técnica FDM desde a produção dos filamentos até ao fabrico dos produtos finais, numa perspetiva de entender quais as suas vantagens e limitações em relação a técnicas convencionais. Para este fim, produziu-se filamento utilizando dois materiais (polipropileno reforçado com fibras de vidro, GRPP, e polipropileno não reforçado, PP). Utilizaram-se estes filamentos para construir por FDM dois tipos de objetos (provetes para ensaios de tração, para avaliação da resistência mecânica, e peças, para avaliação estética e dimensional). Foram realizados ensaios de tração, caracterização morfológica e avaliação estética e dimensional. Identificaram-se as condições de impressão conducentes ao melhor desempenho de componentes produzidos pela técnica FDM. Foi feita uma comparação com provetes moldados por compressão, em termos de resistência à tração. Compararam-se objetos produzidos por FDM com os dois materiais em termos mecânicos, estéticos e dimensionais.

Foram produzidos com sucesso filamentos com os dois materiais e definiram-se as respetivas janelas operatórias. A resistência à tração foi maior para os provetes com deposição longitudinal e maiores graus de enchimento. O módulo de elasticidade dos provetes de FDM não reforçados foi 74 % dos valores registados para os provetes reforçados. Os provetes de FDM apresentaram 67 % do valor do módulo de elasticidade dos provetes moldados por compressão. Através da caracterização morfológica foi possível perceber que há uma boa adesão entre filamentos, o que explica a pouca influência da orientação da deposição na resistência à tração. Dimensionalmente, os objetos em PP reforçado apresentaram os melhores resultados. Em termos estéticos, os

objetos em PP não reforçado apresentaram elevada transparência, mas maior irregularidade superficial. Os objetos em PP reforçado eram opacos e apresentavam zonas esbranquiçadas e outras enegrecidas.

ABSTRACT

From the various existing AM (Additive Manufacturing) techniques, the FDM technique (Fused Deposition Modeling), only recently began to be seen as a potential technique for product manufacturing. However, the range of commercially available filaments for FDM use is limited and costly, being, therefore, used mainly in the production of prototypes. Thus, neither the materials nor the process were studied systematically in order to produce functional components, with adequate mechanical strength, or at getting time / competitive production costs for small / medium series production, respectively.

The objectives of this thesis are the study of the FDM technique from the production of filaments to the manufacture of final products, aiming at understanding their advantages and limitations over conventional techniques. To this end, the filament was produced using two materials (glass reinforced polypropylene, GRPP, and non-reinforced polypropylene, PP). These filaments were used on FDM to build two types of objects (specimens for tensile tests, for mechanical assessment, and parts, for aesthetic and dimensional assessment). Tensile tests, morphological characterization, aesthetic and dimensional evaluations were undertaken. Printing conditions conducive to better performance of components produced by the FDM technique were identified. A comparison with compression molded test specimens, in terms of tensile strength was made. FDM objects produced with the two materials were compared in terms of mechanical, aesthetic and dimensional properties.

Filaments were produced with success with both materials and the respective operative windows were outlined. The tensile strength was greater for specimens with longitudinal deposition and higher degrees of filling. The elastic modulus of the FDM non-reinforced samples was 74 % of that recorded for the reinforced specimens. FDM specimens presented 67 % of the elastic modulus value of the compression molded samples. The morphological characterization enabled to conclude that there is a good adhesion between filaments, which explains the little influence of the deposition orientation on tensile strength. Dimensionally, the objects produced with reinforced PP showed the best results. In aesthetic terms, the objects in non-reinforced PP showed higher transparency but greater surface irregularity. The reinforced objects presented whitish and blackened zones.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	8
1.2. Objetivos	9
1.3. Organização da Dissertação	10
2. TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO FUNDIDO.....	11
2.1. Técnica	11
2.2. Materiais.....	13
2.3. Caraterização dos produtos produzidos por FDM.....	16
2.4. Aplicações da tecnologia FDM	19
3. TRABALHO EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Materiais.....	23
3.2. Extrusão de filamento para FDM	26
3.3. Produção de amostras.....	32
3.3.1. Impressão 3D dos componentes por FDM	32
3.3.2. Moldação por compressão.....	50
3.4. Caraterização dos componentes produzidos por FDM.....	54
3.4.1. Ensaio de tração	54
3.4.2. Avaliação estética e dimensional	55
3.4.3. Caraterização morfológica	55
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
4.1. Ensaio de tração.....	57
4.2. Avaliação estética e dimensional	66

4.3. Caraterização morfológica	70
5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
Anexo I - Ficha técnica do material: ISPLEN PP 040 C1E (PP)	79
Anexo II - Ficha técnica do material: POLIFOR L6GF/30 NATURALE (GRPP).....	80
Anexo III - Especificações da impressora Prusa I3.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do SLA [1]	2
Figura 2 - Esquema representativo do SLS [1].....	3
Figura 3 - Esquema representativo do LOM [1].....	4
Figura 4 - Esquema representativo do Z corp 3DP [1].....	5
Figura 5 - Esquema representativo do Solidscape Ink-Jet 3D [1]	5
Figura 6 - Esquema representativo do Objet for photopolymers [1]	6
Figura 7 - Esquema representativo do FDM [1].....	7
Figura 8 - Prusa i3	11
Figura 9 - Esquema em corte, representativo da cabeça de impressão.....	12
Figura 10 - Imagem de superfície de fratura (TLCP/PP – 40/60 wt%) [2]	15
Figura 11 - Orientações de deposição e dimensões dos provetes de tração (dimensões em mm) [5]	16
Figura 12 - Resistência à tração dos vários espécimes (espaçamento nulo) [6]	17
Figura 13 - Processo de formação de ligações entre dois filamentos: (1) contato das superfícies; (2) crescimento do pescoço; (3) difusão molecular [8].....	19
Figura 14 - Parte construída por FDM [9]	20
Figura 15 - Sistema montado no motor [9]	20
Figura 16 - Molde de ABS [10].....	21
Figura 17 - Stent em silicone [10]	21
Figura 18 - Polimerização do polipropileno	23
Figura 19 - Vista geral da linha de extrusão utilizada na produção dos filamentos	26
Figura 20 - Depósito de circulação de água	27
Figura 21 - Vazios no filamento	27
Figura 22 - Esquema representativo da posição da peça metálica	28
Figura 23 - Esquema representativo da linha de extrusão utilizada	29
Figura 24 - Rolo de monofilamento (PP)	30
Figura 25 - Esquema representativo da posição do dispositivo de contacto e das forças atuantes no filamento.....	31
Figura 26 - Caixa de paredes finas (Netfabb).....	32
Figura 27 - Cama de vidro revestido com fita de pintura.....	33
Figura 28 - Encurvamento da 1ª impressão	34

Figura 29 - Esquema representativo dos parâmetros: altura da camada e largura do filamento (1 - largura standard; 2 - largura superior)	35
Figura 30 - Cama de placa de PP.....	36
Figura 31 - Placa riscada com x-ato	36
Figura 32 - Placa com rugosidades.....	36
Figura 33 - Objeto imprimido sobre placa de PP	37
Figura 34 - Objeto imprimido com GRPP sobre placa de PP	38
Figura 35 - Dimensões nominais dos provetes da norma DIN 53504-S3a (mm) [11]....	39
Figura 36 - Designação dos provetes padrão.....	42
Figura 37 - Orientação de deposição dos provetes do tipo C45°/H0.2/100% (padrão)...	42
Figura 38 - Primeiras linhas de comando da 1ª e 2ª camada. A vermelho, o valor eliminado na linha da 2ª camada; a verde, o valor na 2ª camada	43
Figura 39 - Orientação de deposição dos provetes do tipo 0°/H0.2/100%	44
Figura 40 - Orientação de deposição dos provetes do tipo 90°/H0.2/100%	44
Figura 41 - Orientação de deposição dos provetes do tipo 45°/H0.2/100%	45
Figura 42 - Orientação de deposição dos provetes do tipo C0°/90°/H0.2/100%	45
Figura 43 - Orientação de deposição dos provetes do tipo C45°/H0.2/ (20% e 60%)....	46
Figura 44 - Provede do tipo 0°/H0.2/100%	47
Figura 45 - Provede do tipo FV/C45°/H0.2/100%	47
Figura 46 - Peças a produzir para avaliação estética e dimensional (Netfabb)	48
Figura 47 - Esquema de impressão (z = 2.2 mm).....	48
Figura 48 - Processo de empenamento das placas de PP	49
Figura 49 - Solução adotada para impressão dos conjuntos em PP	50
Figura 50 - Imagem da montagem parcial.....	50
Figura 51 - Prensas de compressão Moore.....	51
Figura 52 - Conjunto para o corte dos provetes.....	52
Figura 53 - Placa 1.....	52
Figura 54 - Dimensões avaliadas e valores nominais.....	55
Figura 55 - Modos de falha dos vários tipos de provetes	57
Figura 56 - Curvas tensão-deformação (Padrão).....	58
Figura 57 - Curvas tensão-deformação das orientações (a) 0°, (b) 90°, (c) 45°, (d) 0°/90°	58
Figura 58 - Módulo de elasticidade (estudo da orientação).....	59
Figura 59 - Tensão máxima (estudo da orientação)	59
Figura 60 - Curvas tensão-deformação (C45°/H0.35/100%)	60

Figura 61 - Módulo de elasticidade (estudo da altura da camada).	61
Figura 62 - Tensão máxima (estudo da altura da camada).	61
Figura 63 - Curvas tensão-deformação para os enchimentos de 20% (a) e 60% (b)	61
Figura 64 - Módulo de elasticidade (estudo do enchimento)	62
Figura 65 - Tensão máxima (estudo do enchimento).	62
Figura 66 - Regressão linear (módulo de elasticidade).	62
Figura 67 - Regressão linear (tensão máxima).	62
Figura 68 - Relação percentual do módulo e tensão máx. (enchimento)	63
Figura 69 - Curvas tensão-deformação (FV/C45°/H0.2/100%)	63
Figura 70 - Módulo de elasticidade (estudo do efeito dos reforços).	64
Figura 71 - Tensão máxima (estudo do efeito dos reforços)	64
Figura 72 - Curvas tensão-deformação (M/COMP)	64
Figura 73 - Curvas tensão-deformação (FV/M/COMP).....	64
Figura 74 - Módulo de elasticidade (estudo das técnicas).....	65
Figura 75 - Tensão máxima (estudo das técnicas).....	65
Figura 76 - Gráfico comparativo de tensão máxima e módulo de elasticidade.....	65
Figura 77 - Conjunto construído por FDM com PP	66
Figura 78 - Conjunto construído por FDM com GRPP.....	67
Figura 79 - Conjuntos construídos por FDM com GRPP (montados)	67
Figura 80 - Desvios médios para cada dimensão	70
Figura 81 - Superfície de fratura (zona 1)	71
Figura 82 - Superfície de fratura para (a) zona 2, (b) zona 3	72
Figura 83 - Ficha técnica do material: ISPLEN PP 040 C1E [12]	79
Figura 84 - Ficha técnica do material: POLIFOR L6GF/30 NATURALE [13]	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do ISPLEN® PP 040 C1E	25
Tabela 2 - Propriedades do POLIFOR L6 GF/30 NATURALE	25
Tabela 3 - Condições de processamento (PP)	29
Tabela 4 - Condições de processamento (GRPP)	32
Tabela 5 - Condições de impressão ótimas	39
Tabela 6 - Parâmetros estudados e valores adotados	40
Tabela 7 - Designação dos provetes testados	41
Tabela 8 - Pesos obtidos na calcinação	54
Tabela 9 - Resultados da avaliação dimensional dos conjuntos de PP	68
Tabela 10 - Resultados da avaliação dimensional dos conjuntos de GRPP	68
Tabela 11 - Resultados dos desvios dimensionais dos conjuntos	69
Tabela 12 - Especificações da impressora Prusa i3	81

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

3DP	Impressão 3D
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society of Testing Materials
CAD	Computer Aided Design
DIC	Differential interference contrast
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of experiments
E	Módulo de elasticidade
FDM	Fused Deposition Modeling, Modelação por deposição de fundido
GRPP	Polipropileno reforçado com fibras de vidro
ISO	International Standards Organization
LOM	Laminated Object Manufacturing
MFR	Melt Flow Rate
Nylon 12	Poliamida 12
PC	Policarbonato
PLA	Poli (ácido láctico)
PP	Polipropileno
PPSF/PPSU	Polifenilsulfona
PTFE	Politetrafluoretileno
RP	Rapid Prototyping, Prototipagem rápida
SEM	Microscopia eletrónica de varrimento
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Structured Triangular Language
TLCP	Polímero líquido cristalino termotrópico
T_g	Temperatura de transição vítrea
VGCFs	Vapor-grown carbon fibers
ε	Deformação
σ máx.	Tensão máxima

1. INTRODUÇÃO

A prototipagem rápida (RP-Rapid Prototyping) representa uma nova fase na evolução da prototipagem. Com os últimos avanços nesta área é possível construir modelos físicos mais rapidamente e com geometrias mais complexas. Desde 1988 surgiram mais de 20 diferentes técnicas de prototipagem rápida, técnicas que têm em comum serem aditivas (AM-Additive Manufacturing). As primeiras técnicas que surgiram foram utilizadas para construir modelos e protótipos, mas hoje em dia são utilizadas para uma gama muito maior de aplicações, incluindo o fabrico de produtos finais em pequenas séries.

As técnicas de AM caracterizam-se por construir os objetos em camadas e possibilitam a construção de peças com geometrias complexas. Nalguns casos os objetos produzidos por estas técnicas podem ser o produto final, mas normalmente estes não têm as propriedades mecânicas ou a precisão dimensional necessárias para as aplicações desejadas.

Os métodos de AM têm um princípio de funcionamento completamente diferente dos métodos clássicos de manufatura subtrativa. Com o desenho CAD do objeto, este é dividido em finas fatias que são posteriormente processadas individualmente pelo equipamento de AM, construindo o objeto camada a camada. No final são retirados os eventuais suportes e procede-se aos acabamentos.

Como já foi referido são várias as técnicas de AM, das quais as mais utilizadas são:

- **SLA (Stereolithography)**

A técnica de SLA constrói objetos camada a camada através da ação de um feixe laser na superfície dum fotopolímero líquido. Este tipo de materiais solidifica rapidamente nas zonas atingidas pelo feixe laser. Assim que uma camada está terminada, a plataforma de construção baixa uma pequena distância para que seja depositada nova resina que cobre a primeira camada. Inicia-se assim a construção da segunda camada do objeto através da atuação do laser. Este processo repete-se até à construção final do objeto. No final o objeto é retirado e mergulhado numa solução, a fim de extrair o fotopolímero líquido em excesso.

Esta técnica permite a construção de objetos com boa estabilidade dimensional, bom acabamento superficial e é possível produzir objetos transparentes. No entanto tanto equipamentos como materiais são dispendiosos e no final, caso a geometria dos objetos requeira o uso de estruturas de suporte, é necessário separá-las do objeto. Para além disso é necessário um processo de pós cura numa câmara ultravioleta. Na Figura 1 pode ver-se um esquema representativo da técnica.

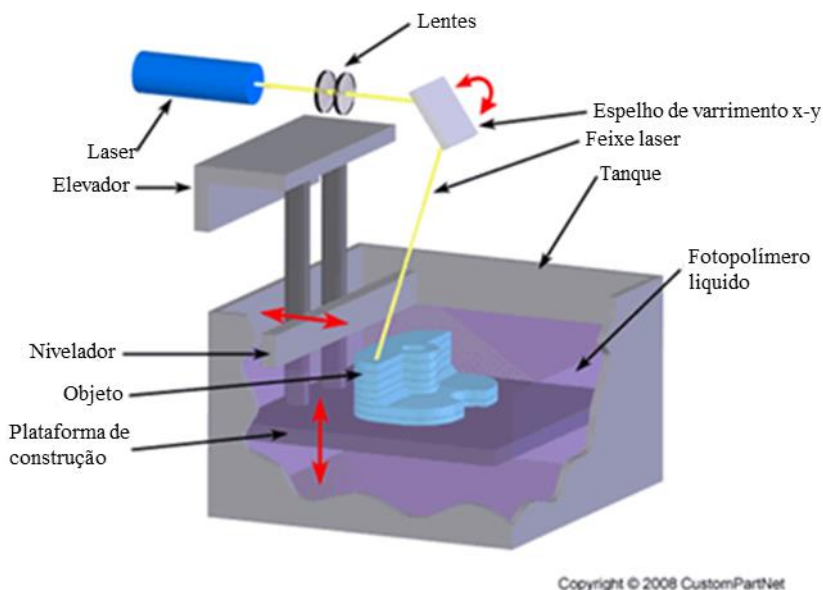


Figura 1 Esquema representativo do SLA [1].

- **SLS (Selective Laser Sintering)**

Esta técnica é semelhante à de SLA, mas em vez de resina líquida utiliza material em pó que é espalhado com um rolo. A plataforma de construção baixa o equivalente à espessura duma camada para receber a nova camada de pó. Um feixe laser é depois usado para fundir e sinterizar o material, criando uma camada do objeto. A temperatura da câmara é mantida ligeiramente abaixo do ponto de fusão do material para que o calor fornecido pelo laser apenas aumente a temperatura o suficiente para provocar a sinterização. Este processo é repetido até à finalização da peça.

Como o material não fundido fornece suporte ao objeto, não é necessária a criação de estruturas de suporte, que teriam de ser retiradas no final. Podem ser utilizados muitos materiais para além de polímeros, tais como, cerâmicos e metais, sendo nestes

casos necessário impregná-los com resina. Os pontos menos fortes desta técnica são o custo de equipamentos e materiais e o facto de em cerâmicos e metais ser necessária uma pós-sinterização para assegurar alguma resistência mecânica. Na Figura 2 pode ver-se um esquema deste processo.

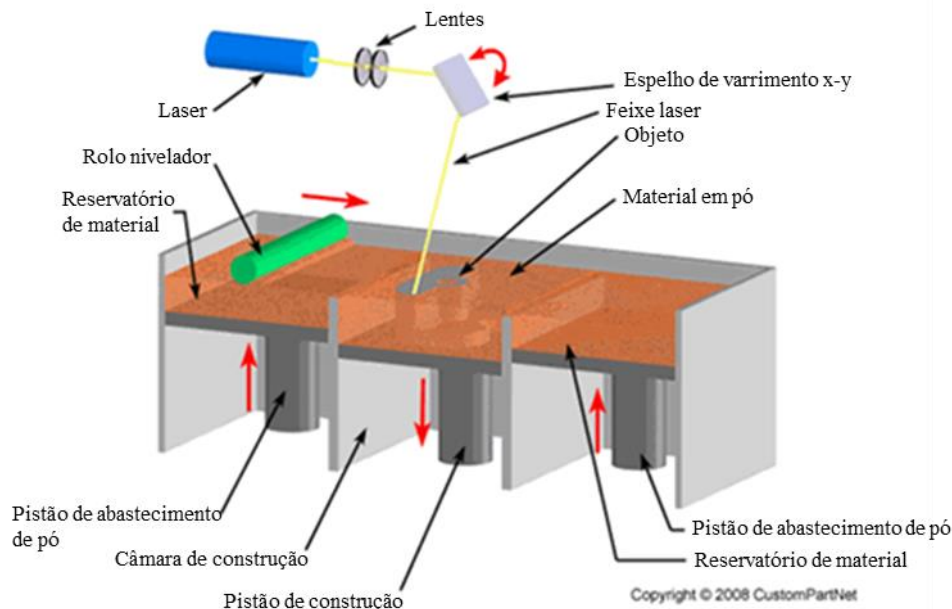


Figura 2 Esquema representativo do SLS [1].

- **LOM (Laminated Object Manufacturing)**

Nesta técnica (Figura 3) as secções transversais do objeto são cortadas de papel utilizando um laser. Existem variações desta técnica que utilizam uma lâmina em substituição do laser. O papel é desenrolado sobre a camada anterior e é colado a esta através dum rolo aquecido que atua na cola térmica existente na base da folha de papel. Os perfis transversais são cortados camada a camada e o material em excesso é retirado e enrolado. Este processo repete-se até à construção da totalidade do objeto.

Apesar de normalmente se utilizar papel nesta técnica, também já foi testado o uso de vários materiais termoplásticos, compósitos de fibra de vidro, cerâmicos e até metais. Esta técnica permite a construção de modelos com dimensões superiores às de outras técnicas. Outra vantagem desta técnica é o facto de utilizar papel, um material relativamente barato, em relação ao utilizado noutras técnicas. No entanto, estes modelos têm que ser selados com tinta ou outros revestimentos para serem

dimensionalmente estáveis e não são normalmente adequados para o teste de produtos e para produtos finais.

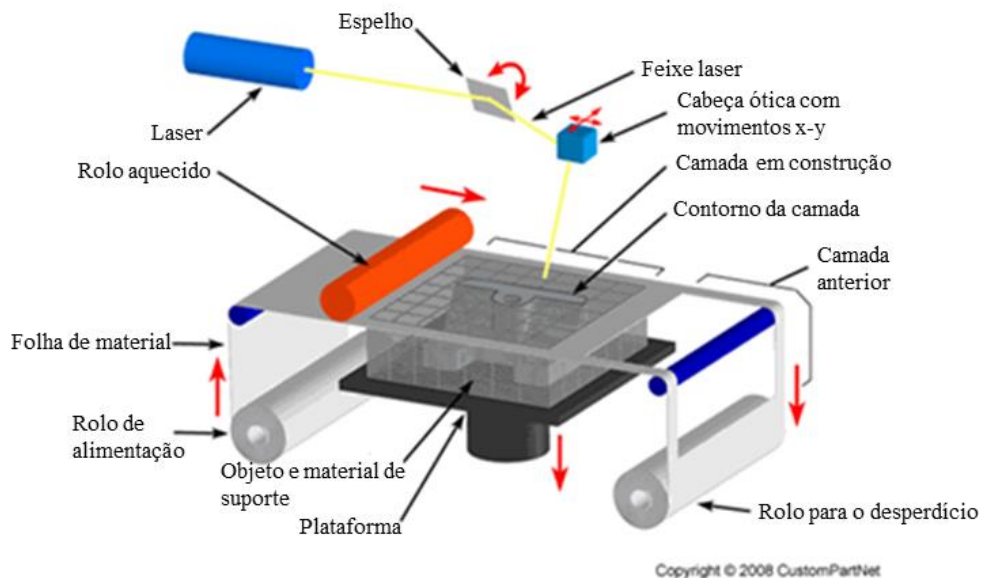


Figura 3 Esquema representativo do LOM [1].

- **Ink-Jet Deposition (Z corp 3DP, Solidscape and Object machines)**

Esta técnica divide-se essencialmente em duas categorias. A primeira (Z corp 3DP) utiliza pó como matéria-prima e é semelhante ao SLS; no entanto, em vez do laser é utilizada uma cabeça de impressão que deposita aglomerante líquido para ligar as partículas de pó. Neste método, inicialmente é espalhada uma camada de pó, depois é depositada uma camada de aglomerante na primeira secção transversal. De seguida a plataforma de construção desce o equivalente à espessura duma camada, é depositada uma nova camada de pó e a cabeça de impressão constrói uma nova secção transversal da peça. Este processo repete-se até à construção total do objeto.

Depois do objeto estar completo é necessário limpá-lo e infiltrá-lo com um selante para aumentar as propriedades mecânicas e a qualidade do acabamento superficial. Esta tecnologia permite a construção de objetos de uma forma rápida e barata. Tem como desvantagens, em relação a outras técnicas, o acabamento superficial, a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas. Na Figura 4 pode ver-se um esquema desta técnica.

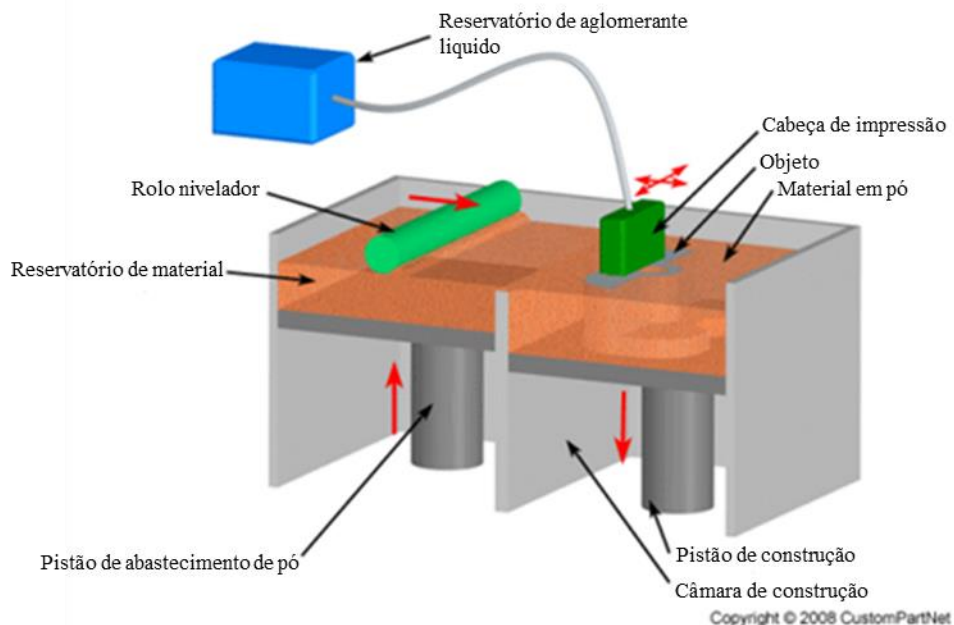


Figura 4 Esquema representativo do Z corp 3DP [1].

A outra categoria de Ink-Jet Deposition divide-se em duas subcategorias (Solidcape for wax e Objet for photopolymers). Na Figura 5 pode ver-se um esquema representativo da impressora Solidcape Ink-Jet 3D. Esta utiliza um material plástico para construção e um material tipo cera para suporte.

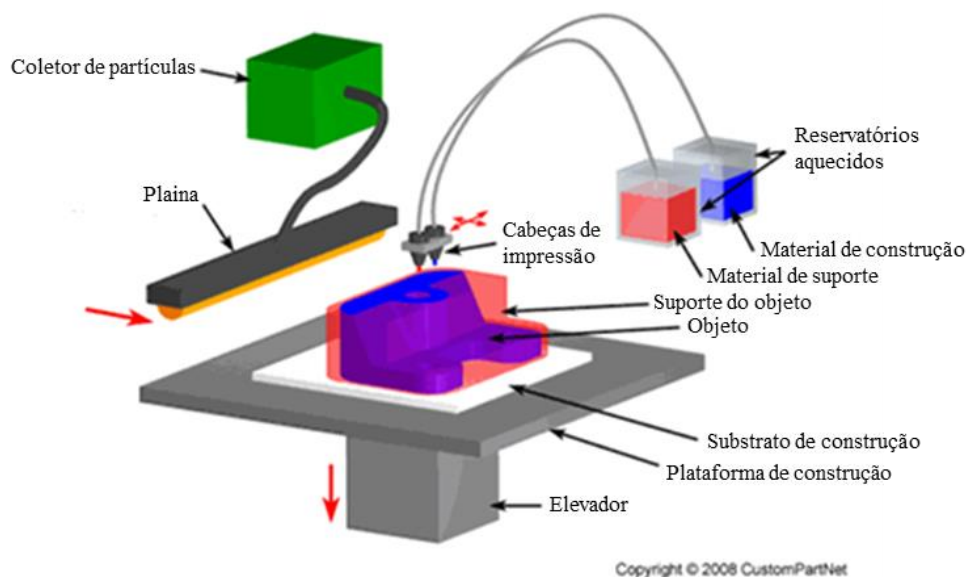


Figura 5 Esquema representativo do Solidcape Ink-Jet 3D [1].

Estes materiais estão armazenados no estado líquido em reservatórios aquecidos. Os materiais são depositados sob a forma de gotas através de cabeças de impressão distintas e solidificam rapidamente. Depois duma camada construída, um dispositivo, plaina, passa sobre ela para obter uma espessura uniforme. Neste processo as partículas sobrantes são aspiradas e capturadas por um filtro. O processo é repetido para o resto do objeto. Depois do objeto estar completo o material tipo cera pode ser dissolvido ou fundido. Esta técnica permite obter uma excelente resolução dos objetos e um bom acabamento superficial. Por outro lado, é lenta para objetos de grandes dimensões e a gama de materiais disponíveis é muito limitada.

O equipamento Objet (Figura 6) é baseado em fotopolímeros e é considerado um promissor substituto para o SLA. Nesta técnica o fotopolímero é depositado na plataforma de construção criando uma camada. São utilizados dois materiais diferentes, um para a construção propriamente dita, o outro, um fotopolímero tipo gel, para suporte. Após a deposição de cada camada, uma lâmpada ultravioleta move-se por cima da secção emitindo radiação UV, promovendo, assim, a cura do fotopolímero (endurecimento da camada).

O aspeto visual dos objetos é semelhante aos produzidos por SLA. Esta técnica permite a construção de modelos com boa resolução e bom acabamento superficial, mas em termos de propriedades mecânicas e definição dos objetos não é tão forte como o SLA.

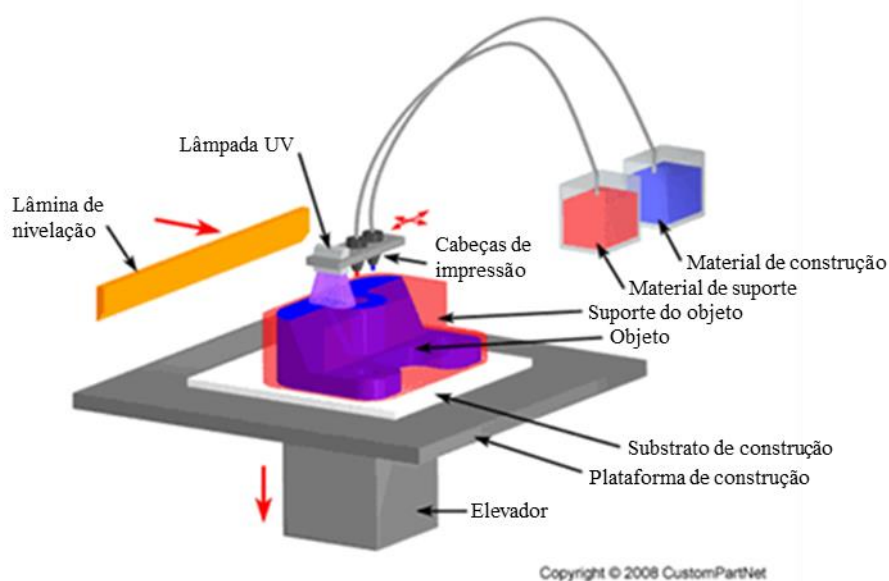


Figura 6 Esquema representativo do Objet for photopolymers [1].

- **FDM (Fused Deposition Modeling)**

O FDM é um método limpo e relativamente simples de utilizar. Neste processo um material termoplástico ou cera é extrudido através de um bico que o deposita camada a camada para construir o objeto. A alimentação do material no equipamento é realizada através de rolos de filamento. Neste método o bico é aquecido por resistências de aquecimento que mantêm o material a uma temperatura acima do seu ponto de fusão, para que este flua facilmente através do bico e adira ao material já depositado. O plástico endurece rapidamente depois de fluir pelo bico e liga-se à camada anterior. Genericamente, a construção camada a camada processa-se através do movimento relativo entre bico e base. Estes movimentos decorrem nos planos XYZ, sendo o plano XY referente à base e o plano Z referente à altura. Na Figura 7 pode ver-se um esquema desta técnica.

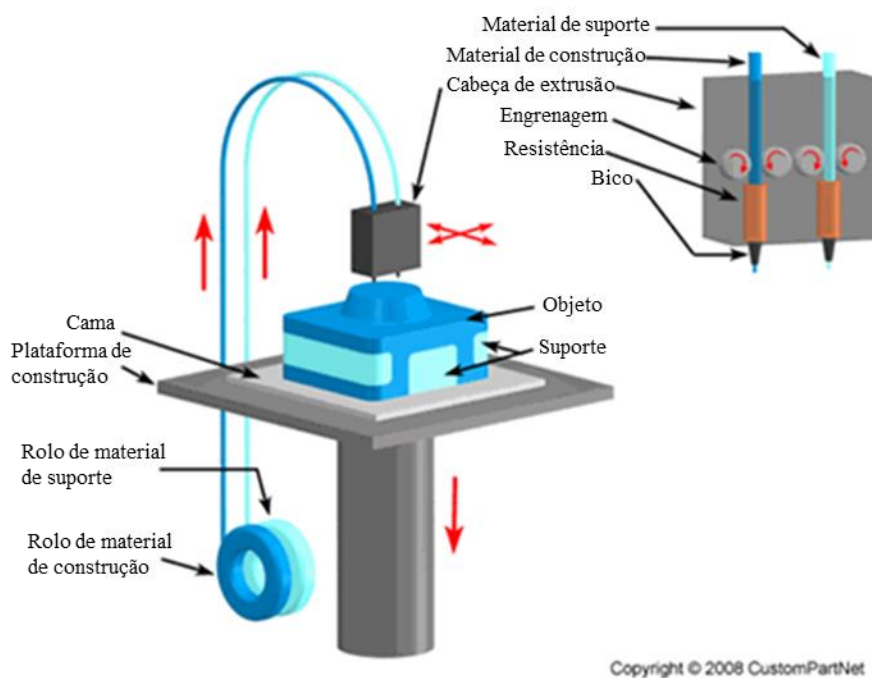


Figura 7 Esquema representativo do FDM [1].

Existem máquinas de FDM que têm dois ou mais bicos de extrusão de forma a possibilitarem a produção de estruturas de suporte com outros materiais, para peças com geometrias mais complexas. No entanto é possível construir estruturas de suporte apenas com uma cabeça de extrusão, utilizando o mesmo material de construção das

peças. Estas estruturas são mais tarde removidas separando-as da peça. Existe também a possibilidade de utilizar um material de suporte solúvel em água, que pode ser extraído mergulhando o conjunto em água. A existência de mais bicos possibilita ainda a deposição simultânea de vários materiais e/ou cores de forma a melhorar propriedades mecânicas, funcionais ou estéticas.

Neste estudo a técnica abordada será o FDM, devido à sua massificação e disponibilidade (tanto a nível industrial como a nível individual). Esta técnica possibilita o uso de uma gama relativamente alargada de materiais e produz objetos leves e relativamente resistentes. Os equipamentos de FDM são aqueles que apresentam maior potencial em termos de construção de produtos de uso final, uma vez que é possível o uso de uma ampla gama de materiais, quando comparada com as restantes técnicas concorrentes, sobretudo polímeros termoplásticos. Esta característica aproxima esta técnica das técnicas convencionais de produção de peças plásticas, em termos de propriedades finais dos produtos.

1.1. Motivação

Das várias técnicas existentes de AM, a técnica de modelação por deposição de filamento fundido que existe desde os anos 80, só começou muito recentemente a ser vista como uma potencial técnica de manufatura de produtos, com capacidade de competir com as técnicas convencionais. No entanto, a gama de filamentos comercialmente disponíveis para utilização neste tipo de equipamentos é limitada e onerosa e os equipamentos continuam a ser essencialmente utilizados na produção de protótipos. Logo, nem os materiais, nem o processo, foram estudados de forma sistemática no sentido de produzir componentes funcionais, com resistência mecânica adequada, ou no sentido de conseguir tempos/custos de produção competitivos para pequenas/médias séries de produção, respetivamente.

Os estudos realizados até ao momento focam-se pouco no estabelecimento da janela operatória de extrusão a utilizar na produção de filamentos com o diâmetro e homogeneidade adequados à utilização em FDM. Esta informação seria essencial para uma maior aposta da utilização desta técnica na produção de produtos de uso final, uma vez que se poderiam maximizar as suas propriedades, usufruindo de um maior controlo sobre o processo. O uso de filamentos comerciais, usados na maioria dos estudos publicados, limita-os às variáveis inerentes ao processo FDM propriamente dito.

As comparações, tanto em relação a propriedades mecânicas, como morfológicas, entre peças produzidas em FDM e peças produzidas por técnicas convencionais de moldação (moldação por compressão, por exemplo) seriam mais autênticas se o material utilizado para produzir os filamentos fosse o mesmo que o utilizado para a moldação por técnicas convencionais.

A literatura carece de estudos que acompanhem o processo FDM desde o início, isto é, desde a extrusão do filamento, que permita um controlo absoluto dos processos. Seria útil, por exemplo, produzir filamentos com materiais reforçados e não reforçados e comparar as peças produzidas em FDM, tanto mecânica como morfológicamente, com peças produzidas por técnicas convencionais.

1.2. Objetivos

Os objetivos desta tese são o estudo da técnica FDM desde a produção dos filamentos até ao fabrico dos produtos finais, numa perspetiva de entender quais as suas vantagens e limitações em relação a técnicas convencionais. A comparação será feita com a moldação por compressão, uma vez que os produtos fabricados com esta técnica apresentam reduzida anisotropia, o que faz da moldação por compressão a técnica mais adequada para avaliar o efeito da orientação de deposição no FDM. Outro objetivo é perceber e controlar todos os estágios envolvidos no processo, o que proporcionará ferramentas para a melhoria dos produtos fabricados por este método, sobretudo em termos de propriedades mecânicas. Estas limitações têm restringido quase unicamente o uso desta técnica à produção de protótipos, o que, se tivermos em conta as potencialidades do FDM é uma demonstração do seu subaproveitamento.

O trabalho a realizar para se atingir o objetivo proposto, será realizado em dois estágios principais:

- i) Estabelecimento da janela operatória a utilizar na produção de filamentos com o diâmetro e homogeneidade adequados à utilização em equipamentos FDM, o que possibilitará uma fácil e barata produção destes filamentos em posteriores trabalhos. Para além disso, os conhecimentos adquiridos neste estágio possibilitarão a futura produção de filamentos com outros materiais. Serão produzidos filamentos com dois materiais distintos;

ii) Identificação das condições de impressão conducentes ao melhor desempenho de componentes produzidos pela técnica FDM, com foco nos seguintes parâmetros: grau de enchimento, orientação da deposição e altura da camada, sendo que em estudos anteriores estes parâmetros revelaram ser os de maior relevância na definição das propriedades finais dos produtos.

Dada a abrangência deste estudo, que acompanha o processo FDM desde a produção do filamento até à manufatura de produtos, espera-se poder contribuir para o aumento do potencial deste método para a manufatura de produtos de uso final.

1.3. Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução à dissertação, com foco nos aspetos da motivação, objetivos e organização da dissertação.

No Capítulo 2 faz-se uma descrição em detalhe do processo de FDM. Refere-se a impressora utilizada, fala-se das características da mesma e do seu enquadramento em termos da oferta atual destes equipamentos. Apresenta-se também a informação recolhida sobre a técnica, referindo estudos efetuados abarcando as temáticas de materiais, caracterização e aplicações.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição do trabalho experimental realizado, abarcando a extrusão dos monofilamentos, a produção de amostras e a caracterização das mesmas.

No Capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados relativos aos ensaios de tração, avaliação estética, dimensional e morfológica.

No Capítulo 5 são apresentadas conclusões gerais do trabalho, assim como as perspetivas de trabalho futuro.

2. TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO FUNDIDO

2.1. Técnica

A técnica de deposição de filamento fundido foi desenvolvida pela Stratasys em Eden Prairie, Minnesota. Entretanto houve o surgimento de outras empresas que produzem equipamentos de FDM. No entanto, estes equipamentos mantiveram-se sempre a preços muito elevados e para além disso não apresentavam uma grande flexibilidade em termos do uso de novos materiais e definição dos parâmetros de impressão.

De forma a tornar mais acessível a impressão 3D foi criado o movimento RepRap. Este é um projeto comunitário de código aberto, que permite que todos possam participar no desenvolvimento da técnica. Esta comunidade fornece informação que possibilita que se possa construir equipamentos FDM em casa. Outra característica importante deste tipo de impressora é que é constituída parcialmente por peças produzidas por impressão 3D. Este facto faz com que as impressoras RepRap sejam usadas para construir peças para elas próprias.

A impressora utilizada neste estudo é uma Prusa i3 (Figura 8). Este equipamento de FDM é o último projetado pela Prusa Mendel, um dos principais nomes do movimento RepRap.

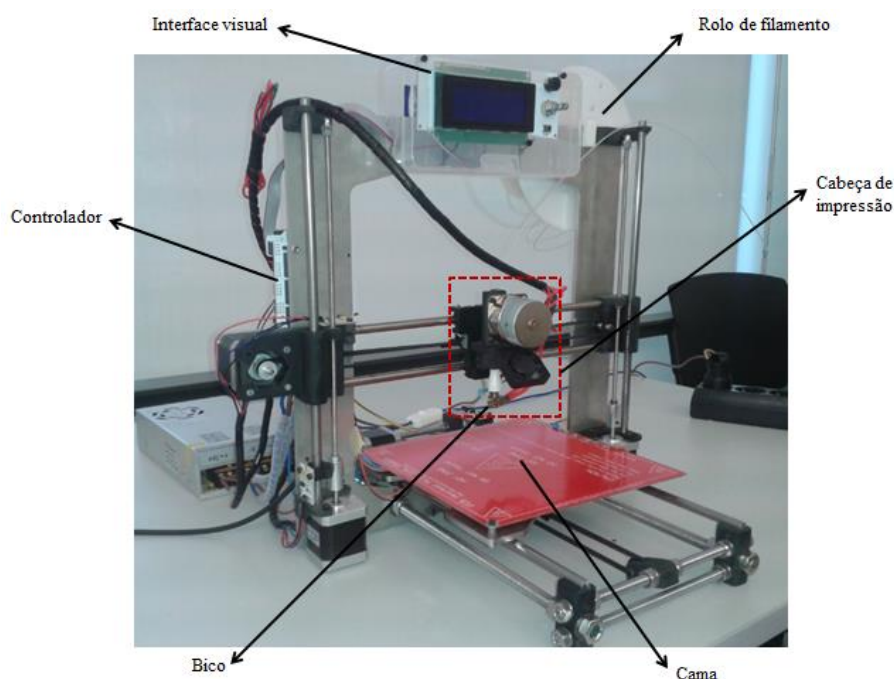


Figura 8 Prusa i3.

O diâmetro do filamento utilizado por esta impressora é de 1.75 mm. Este diâmetro é bastante comum em FDM, mas também são muito utilizadas cabeças de impressão que permitem o uso de filamento de 3 mm. A cabeça de impressão, que se encontra esquematizada na Figura 9, é constituída por um motor de passo, que aciona uma engrenagem de transmissão e assim empurra o filamento em direção ao bico. O bico tem a função de fundir o material e encontra-se acoplado a um suporte cerâmico. Este tem como finalidade, para além do suporte do bico, o isolamento térmico em relação aos restantes constituintes da cabeça de impressão. Entre o filamento e o suporte cerâmico está colocado um tubo de PTFE (Politetrafluoretileno), com o objetivo de diminuir o atrito na passagem do filamento e assim impedir o entupimento. O ventilador tem a função de arrefecer o filamento na zona do suporte cerâmico, impedindo que o mesmo funda. Para um bom funcionamento do processo, é necessário manter o filamento sólido nesta zona, para que possa ser gerada pressão sobre o material fundido no bico. O bico do equipamento utilizado apresenta um diâmetro de 0.4 mm, que podemos considerar um diâmetro intermédio, uma vez que estão disponíveis para este equipamento bicos com 0.35 mm e 0.5 mm de diâmetro.

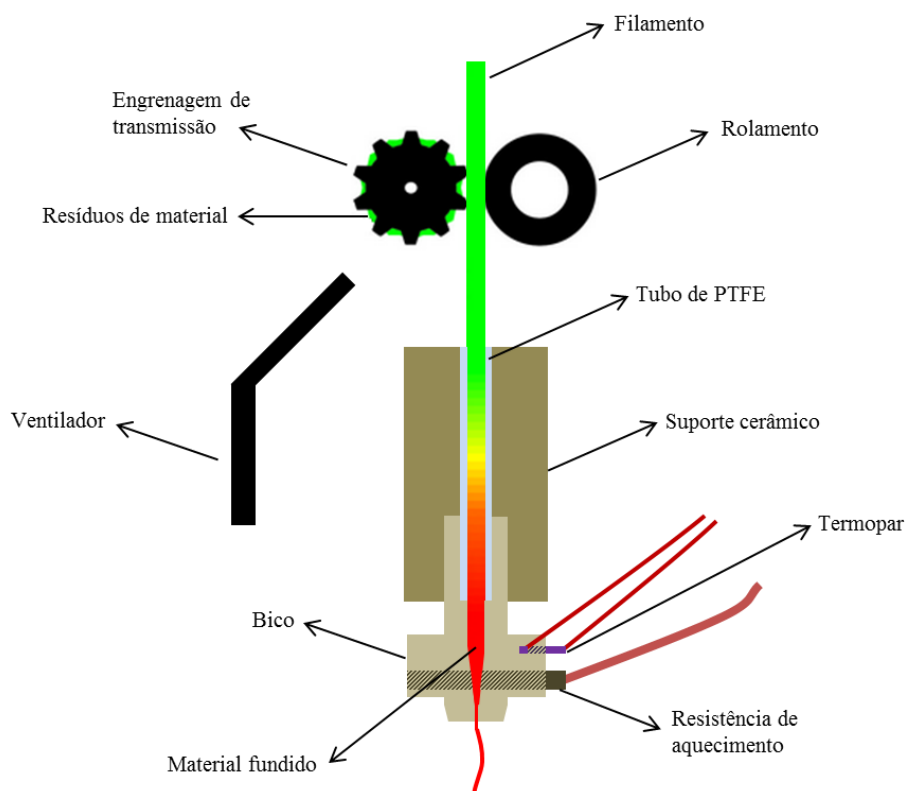


Figura 9 Esquema em corte, representativo da cabeça de impressão.

No bico encontra-se a resistência de aquecimento, que fornece calor para a fusão do material, e o termopar, que possibilita o controlo da temperatura. Outro constituinte importante é a cama, onde são construídas as peças e que permite o seu aquecimento no caso de materiais e peças onde exista uma baixa adesão entre objeto e cama. Por exemplo, no caso do ABS é sugerido que a cama esteja a 110 °C e para o PLA a temperatura recomendada encontra-se nos 60 °C.

O interface visual é um visor onde se pode observar informação relevante para as impressões, tal como, temperatura do bico, temperatura da cama e posição da cabeça de impressão em relação ao ponto no espaço definido como origem dos três eixos (x,y,z).

O controlo do equipamento é realizado por intermédio do controlador que emite sinais elétricos para os diversos componentes da máquina. O utilizador controla este dispositivo através de softwares específicos para impressoras 3D. Na execução deste trabalho foram utilizados vários softwares, sendo a maior parte deles gratuitos e descarregados a partir da internet. Os softwares utilizados foram os seguintes:

- Solidworks - Para fazer os desenhos em 3D dos objetos; estes desenhos tiveram de ser guardados como ficheiros STL;
- Netfabb - Para fazer alterações e correções nos ficheiros STL;
- Slic3r - Para fazer o corte virtual dos objetos em camadas e definir os vários parâmetros a variar no estudo. Este software condensa todas as informações relativas à impressão das peças num ficheiro de código G;
- Pronterface - Utiliza o código G para dar instruções ao controlador da máquina.

2.2. Materiais

Os materiais utilizados no FDM são comercializados e utilizados sob a forma de rolos de filamento. Estes materiais permitem construir objetos sólidos com características adequadas para prototipagem e testes funcionais, mas mais importante ainda, para uso final. Os materiais usados neste processo são essencialmente termoplásticos, o que confere aos objetos produzidos estabilidade, baixa distorção, baixa contração e reduzida absorção de humidade, comparando com os materiais utilizados nas outras técnicas de prototipagem rápida. Devido à estabilidade dos termoplásticos em diferentes condições

ambientais, as peças construídas por FDM apresentam uma grande precisão dimensional, mais uma vez quando comparada com a das outras técnicas.

Comercialmente existem vários materiais disponíveis, dos quais o PLA (Poli(ácido láctico)) e o ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) são os mais utilizados. Para além destes dois materiais, pode-se ainda encontrar:

- PC (Policarbonato);
- PPSF/PPSU (Polifenilsulfona);
- ULTEM 9085 (Polieterimida);
- Nylon 12 (Poliamida 12).

No entanto, o uso destes materiais aliado às características do processo FDM não permite criar objetos com as propriedades mecânicas requeridas para grande parte das aplicações de uso final. Daí que tenham sido feitos estudos com outros materiais, incluindo compósitos, de forma a ultrapassar as limitações apresentadas pelos materiais convencionais.

Gray *et al.* [2] realizaram um estudo com um material compósito de PP (Polipropileno) /TLCP (polímero líquido cristalino termotrópico) em que foram avaliadas as condições de processamento deste material por FDM. Neste estudo utilizaram o TLCP pelas excelentes propriedades de resistência à tração. Estas fibras têm também um diâmetro uma ordem de grandeza inferior ao das fibras normalmente usadas para reforço (fibras de carbono e de vidro), o que as torna mais adequadas para processos de extrusão, especialmente para FDM em que o filamento extrudido tem um diâmetro muito reduzido (algumas décimas de milímetro). Para comparação utilizaram um ABS comercial (monofilamento P400 da Stratasys), previamente seco. Produziram filamentos de PP/TLCP através de um processo especialmente desenvolvido para o efeito, uma vez que a temperatura de processamento do TLCP (320 °C) é bastante superior à do PP. Fabricaram placas (com dimensões de 7.6x2x76 mm), através de FDM, com PP/TLCP, TLCP, PP e ABS. A caracterização das placas foi realizada com ensaios de tração e pela análise da superfície de fratura, através de microscopia eletrónica de varrimento (SEM), que proporcionou imagens como a que se ilustra na Figura 10.



Figura 10 Imagem de superfície de fratura (TLCP/PP – 40/60 wt%) [2].

A dispersão das fibras na matriz de PP era uniforme e a orientação das fibras verificou-se na direção de extrusão. Através da análise dos resultados concluíram que o compósito de TLCP/PP (40/60 wt%) apresenta um módulo de elasticidade 100 % maior que o do ABS e 150 % maior que o do PP. Já o módulo de elasticidade do TLCP foi 400 % maior que o do ABS.

As fibras de vidro foram também testadas como reforço por Zhong *et al.* [3], mas com um ABS, ao qual se adicionou também um plasticizante e um compatibilizador. Os diferentes componentes foram misturados numa extrusora de duplo fuso, acoplada a um sistema de granulação. O material granulado foi depois processado numa extrusora convencional para a produção do filamento. Produziram caixas quadradas de paredes finas e das paredes destas caixas extraíram amostras representando deposições longitudinais e transversais. Produziram também caixas com ABS não reforçado. A caracterização envolveu ensaios de tração e análise da superfície de fratura por SEM. Verificaram que as fibras de vidro melhoraram a resistência à tração em relação ao ABS não reforçado. A adição de plasticizante e compatibilizador aumentou a flexibilidade do compósito e ficou claro que este material pode ser utilizado em FDM, com melhorias nas propriedades mecânicas finais das peças.

Num estudo realizado por Shofner *et al.* [4] foram utilizadas VGCFs (Vapor-grown carbon fibers), nano-fibras de carbono que foram combinadas com ABS com uma incorporação de 10 wt%. O material foi preparado recorrendo a um misturador “Banbury”, moldado por compressão e posteriormente extrudido sob a forma de

filamento. Neste estudo produziram provetes com três formas distintas, em ABS com e sem reforço. Mais uma vez, a caracterização incidiu na resistência à tração e na análise da superfície de fratura por SEM. O ABS reforçado contraiu menos que o ABS não reforçado. A resistência à tração aumentou, no ABS reforçado, cerca de 40 %. No entanto, a rigidez do ABS reforçado aumentou alterando as suas propriedades típicas, uma vez que de dúctil passou a frágil.

2.3. Caracterização dos produtos produzidos por FDM

Os objetos construídos por FDM apresentam propriedades únicas, quando comparados com os produzidos por outros processos, dada a especificidade deste processo. São vários os estudos que avaliam as propriedades mecânicas destas peças. Num estudo levado a cabo por Rodriguez *et al.* [5] avaliou-se o comportamento mecânico de provetes produzidos por FDM em ABS. Caracterizaram-se também as propriedades mecânicas de um filamento de ABS para comparação, realizando ensaios de tração e torsão. Discutiu-se o comportamento mecânico de peças construídas por FDM com o mesmo material, tendo sido realizados ensaios de tração com provetes com dimensões de acordo com a norma ASTM D3039, construídos com três orientações de deposição distintas (longitudinal, enviesada e transversal). Estas orientações de deposição encontram-se esquematizadas na Figura 11.

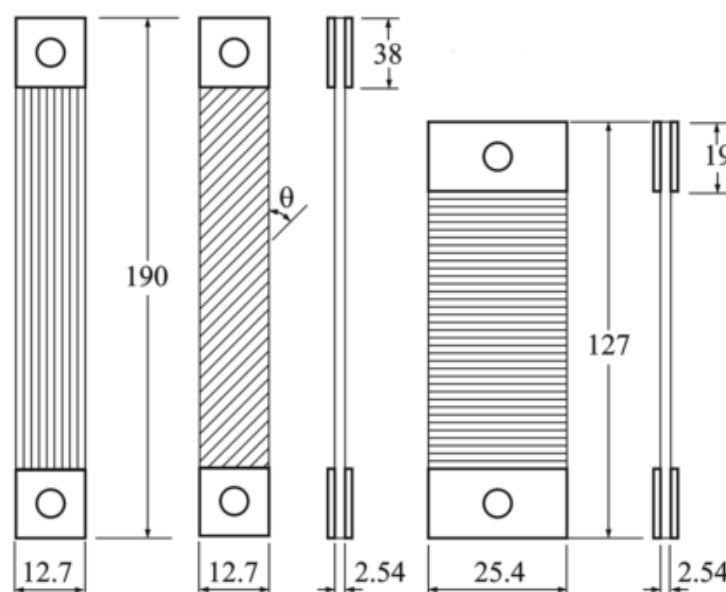


Figura 11 Orientações de deposição e dimensões dos provetes de tração (dimensões em mm) [5].

Os valores do módulo de elasticidade para as peças construídas por FDM com três meso-estruturas foram entre 11 a 37 % mais baixos que os valores correspondentes ao filamento de ABS. A resistência à tração foi entre 22 a 57 % mais baixa. Entre os três tipos de provetes, os provetes com deposição longitudinal apresentaram os melhores resultados. A presença de vazios nas peças construídas por FDM, aliada a uma perda de orientação molecular durante a deposição do filamento, contribuiu para a diminuição da rigidez e resistência à tração de peças construídas por FDM.

Ahn *et al.* [6] realizaram um estudo em que foi usado ABS para determinar as propriedades anisotrópicas de peças construídas com FDM, variando a orientação da deposição, o espaçamento entre filamentos, a largura de filamento, a cor e a temperatura. Foram analisadas a resistência à tração e compressão de provetes construídos segundo várias orientações de deposição e fez-se a comparação com provetes moldados por injeção com o mesmo material. Foi concluído que para este material a distância entre filamentos e a orientação da deposição afetam sobremaneira a resistência à tração de peças construídas por FDM. A largura dos filamentos, a temperatura e a cor revelaram ter pouco efeito. Ficou provado que peças de FDM têm características anisotrópicas. Os resultados dos ensaios de tração para orientações ($45^\circ/-45^\circ$) e ($0^\circ/90^\circ$) com -0.03 polegadas de distância entre filamentos (distância negativa) foram entre 65 a 72 % dos obtidos com os provetes injetados e, para o caso dos provetes produzidos com distância nula entre filamentos foram entre 10 a 73 % inferiores, como se pode constatar na Figura 12.

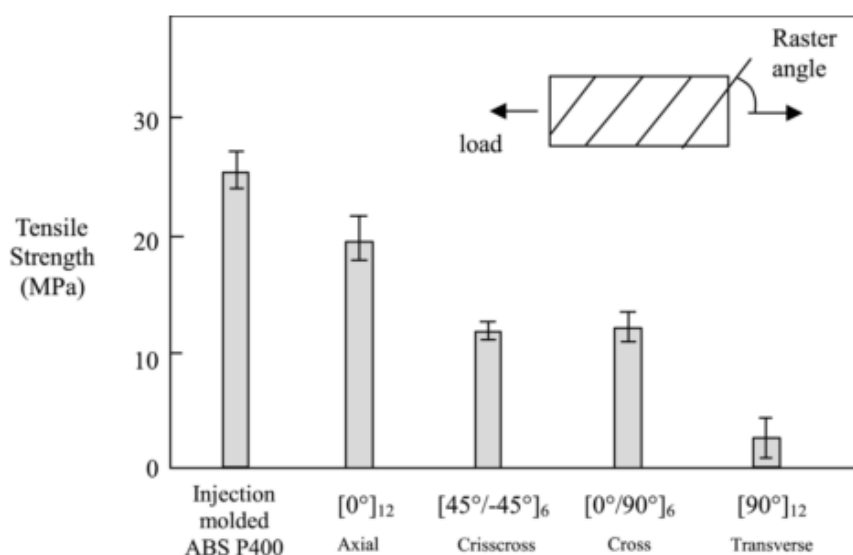


Figura 12 Resistência à tração dos vários espécimes (espaçamento nulo) [6].

A melhor orientação para a resistência à tração foi a orientação de 0° em relação à direção usada nos ensaios de tração. Os valores de resistência à compressão foram superiores aos da resistência à tração para os provetes FDM. A resistência à compressão apresentou valores entre 80 a 90 % da correspondente a provetes injetados.

Utilizando o ABS, Ang *et al.* [7] estudaram estruturas porosas para construção de “scaffolds” para uso em engenharia de tecidos. Foram estudados os efeitos de cinco parâmetros de FDM na porosidade e propriedades mecânicas dos “scaffolds”, nomeadamente a folga entre filamentos, largura dos filamentos, orientação de deposição, número de camadas de construção e perfil de construção. Para tal utilizaram o método DOE (Design of Experiments) e estudaram a resistência à compressão com provetes ASTM D695-02a. Mediram a porosidade com um picnómetro. Verificaram que a folga entre filamentos e a sua largura são os parâmetros mais relevantes na determinação da porosidade e propriedades mecânicas. As maiores porosidades foram encontradas com baixas larguras de filamento e grandes folgas entre filamentos. Ficou também claro que a folga entre filamentos é o parâmetro que tem o maior efeito na resistência à compressão, sendo que quanto maior a folga, menor é a resistência à compressão. A relação entre as propriedades mecânicas do “scaffold” e a porosidade revelou ser logarítmica, com as melhores propriedades mecânicas observadas em “scaffolds” de baixa porosidade.

Outro estudo, efetuado por Sun *et al.* [8], procurou investigar os mecanismos que controlam a formação de ligações entre filamentos extrudidos no FDM. Nestas ligações, a formação de pescoço (sinterização) devido à tensão superficial, aliada à difusão molecular na interface de dois filamentos são os principais mecanismos responsáveis (ver Figura 13). O material utilizado foi, mais uma vez, o ABS. A qualidade das ligações entre filamentos foi avaliada baseada nas características da meso-estrutura e em resultados de ensaios de flexão em placas construídas em FDM. Utilizaram também a microscopia ótica para avaliar a qualidade das ligações. Verificaram que a temperatura do ambiente em que se processa a deposição tem fortes efeitos na meso-estrutura e na qualidade das ligações entre filamentos. Os resultados sugerem que se deve ter um bom controlo sobre as condições de arrefecimento. O fenómeno de sinterização teve um efeito significativo na formação das ligações, mas apenas no curto espaço de tempo em que a temperatura dos filamentos se manteve acima da temperatura crítica de sinterização (temperatura superior à de transição vítrea do material, T_g). Os resultados experimentais mostraram que o material constituinte das peças esteve exposto a

temperaturas superiores a T_g , mas abaixo da temperatura de sinterização, grande parte do tempo do processo de construção. Nestas condições, a deformação plástica e a difusão molecular têm que ser consideradas na previsão da qualidade das ligações e alterações na meso-estrutura.

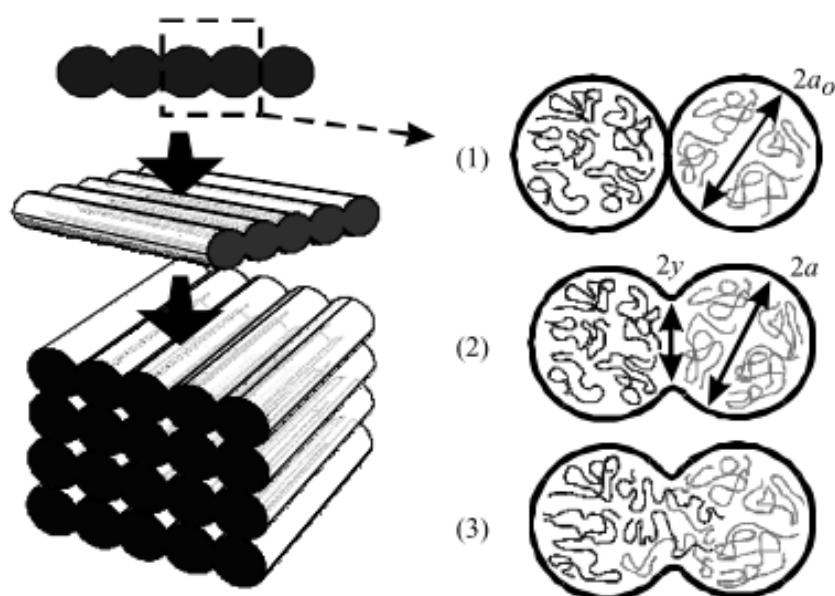


Figura 13 Processo de formação de ligações entre dois filamentos: (1) contato das superfícies; (2) crescimento do pescoço; (3) difusão molecular [8].

2.4. Aplicações da tecnologia FDM

Como já referido, a técnica de FDM foi, numa fase inicial, utilizada quase exclusivamente na construção de modelos e protótipos. No entanto, a construção de peças para uso final vem aumentando nos últimos anos. Esta ferramenta pode ser utilizada no fabrico direto de produtos, mas também pode ser usada em conjunto com outras técnicas.

Um exemplo desta utilização é a construção de um sistema coletor de admissão num estudo efetuado por R. Ilardo e C. Williams [9]. O objetivo deste estudo foi o projeto e construção do referido componente para um motor de 600 cm³ da “Formula Society of Automotive Engineers”. Devido às dificuldades inerentes ao processo tradicional (dobragem e solda de alumínio), é difícil projetar e fabricar sistemas coletores de admissão nos quais as perdas de pressão são mantidas num mínimo e igual

quantidade de ar é fornecida a cada cilindro. A técnica FDM foi usada para criar o sistema, o qual foi posteriormente revestido com camadas de compósito de fibras de carbono.

O FDM permitiu uma maior liberdade na geometria adotada, enquanto o material compósito (associado à resina resistente a altas temperaturas) proporcionou a resistência mecânica e térmica necessárias para esta aplicação. A impressora 3D utilizada foi a Stratasys Dimension SST e o material foi o ABS P400 da mesma empresa. Foi usado também material de suporte (P400-SR) na impressão 3D, uma vez que as peças são ocas. O sistema consiste em duas peças impressas separadamente, que depois de fabricadas foram unidas usando uma resina epóxi (EPOX-EEZ), resistente a temperaturas elevadas (Figura 14).

O compósito de revestimento constituído por folhas de fibra de carbono e resina PTM&W PT2520, foi colocado com o auxílio de vácuo. Além da aplicação do material compósito, foram fixados insertos de alumínio e suportes para impedir que o núcleo de ABS do coletor entrasse em contacto direto com a cabeça do motor, melhorando assim a capacidade do coletor de suportar altas temperaturas. Na Figura 15 pode ver-se a montagem final no motor.

Foi construído assim um coletor de admissão que sobreviveu às elevadas temperaturas e pressões do motor. Os autores verificaram também que houve uma melhor distribuição de carga e maior torque numa ampla gama de rotações, quando comparando com o sistema tradicional de alumínio.



Figura 14 Parte construída por FDM [9].



Figura 15 Sistema montado no motor [9].

Noutro estudo, desenvolvido por Melgoza *et al.* [10], desenvolveu-se uma nova técnica para fabricar stents traqueais personalizados, utilizando parâmetros específicos dos pacientes alvo. A colocação de um stent traqueal é um tratamento paliativo, usado desde 1915, para evitar estenose traqueal (obstrução da traqueia causada por complicações, como tumores malignos, por exemplo). Os stents tradicionais podem ser produzidos em vários materiais, mas não apresentam a adaptabilidade desejada a cada paciente (por exemplo, podem sair da sua posição quando o paciente tosse). Neste estudo foi utilizado um equipamento de FDM Fab@Home, outra das comunidades de código aberto, à semelhança do RepRap. Devido à dificuldade de realizar impressões com os materiais atualmente aprovados para uso médico, resultado das suas características, os autores decidiram utilizar o FDM para construir moldes que seriam depois utilizados para vazamento de silicone de uso médico (LSR - elastomer 40028). Os parâmetros dos pacientes foram obtidos através de tomografia computadorizada. Os moldes foram construídos em ABS. Nas Figuras 16 e 17 pode ver-se o molde de ABS e o stent em silicone.



Figura 16 Molde de ABS [10].



Figura 17 Stent em silicone [10].

Os stents produzidos com esta técnica apresentaram uma boa qualidade superficial e boa estabilidade dimensional. Assim, este método de fabrico de stents traqueais apresenta-se como uma alternativa viável aos métodos tradicionais, tendo como vantagens principais o baixo custo e a adaptabilidade a cada paciente.

Os dois exemplos de aplicações referidos anteriormente mostram como o FDM está a ser útil nas mais variadas áreas, tendo o potencial para mudar a forma como se fabricam os mais variados produtos.

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

Os materiais selecionados para a produção de monofilamento foram um polipropileno homopolímero da Repsol (ISPLEN® PP 040 C1E), PP, e um polipropileno homopolímero reforçado com 30 % de fibra de vidro da SOFTER (POLIFOR L6 GF/30 NATURALE), GRPP. A escolha destes materiais deveu-se ao facto de não serem materiais normalmente utilizados em FDM, onde os polímeros amorfos têm sido os mais usados. Consequentemente são quase inexistentes os estudos com polímeros semi-cristalinos e particularmente com o PP. Dada a utilização massiva deste material pelas indústrias de transformação de plásticos convencionais, que advém das suas propriedades, um estudo da utilização do polipropileno em FDM permitirá aferir o potencial deste material como filamento a ser utilizado em impressoras 3D, determinando os seus pontos fortes e fracos, dando indicações de como pode ser otimizada a sua utilização e alargando, eventualmente, a gama de produtos que podem ser produzidos com esta técnica.

A escolha de um PP reforçado tem o objetivo de avaliar de que forma os reforços alteram as propriedades mecânicas e morfológicas de peças construídas por FDM com Polipropileno.

O PP (Polipropileno) resulta da polimerização por adição do monómero propileno, tal como se ilustra na Figura 18.

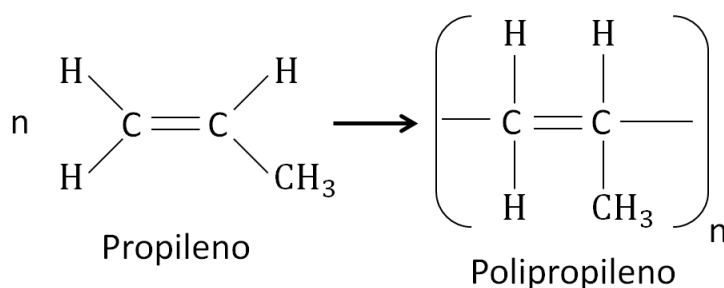


Figura 18 Polimerização do polipropileno.

O PP é um polímero termoplástico cujas principais características são:

- Baixo custo;
- Boa resistência química e a solventes;

- Fácil coloração;
- Elevada resistência à fadiga;
- Boa resistência ao impacto;
- Boa estabilidade térmica.

O PP é utilizado nas mais variadas áreas de aplicação, tais como: têxteis, embalagens, fibras, mobiliário, eletrodomésticos, material hospitalar esterilizável e indústria automóvel; nesta última existem diretivas que visam impulsionar a utilização deste material em cada vez mais elementos dos automóveis, com o objetivo de facilitar a posterior reciclagem de veículos em fim de vida.

O polipropileno utilizado neste estudo é um homopolímero, que apresenta uma elevada rigidez e a resistência à temperatura mais elevada de entre os plásticos de uso comum, permitindo aplicações em contínuo com temperaturas acima dos 100 °C. Apresenta uma contração elevada, como todos os plásticos semi-cristalinos, o que diminui a sua estabilidade dimensional, mas a sua principal limitação é a baixa resistência ao impacto a temperaturas negativas. No entanto, este termoplástico também é utilizado sob a forma de copolímero de blocos ou copolímero aleatório. Nos copolímeros, o etileno é o monómero utilizado na copolimerização.

Uma característica importante do polipropileno é fazer parte do grupo das poliolefinas, isto é, tem como monómero uma olefina simples (também chamada alqueno com a fórmula geral C_nH_{2n}). O polipropileno é uma poliolefina comum obtida da olefina propileno. As superfícies das poliolefinas não são unidas facilmente com o auxílio de solventes porque apresentam excelente resistência a químicos e não são afetadas pelos solventes comuns. Uma vez que possuem uma baixa energia superficial, podem ser unidas com adesivos depois de tratamento superficial. As poliolefinas são quimicamente inertes, mas exibem uma diminuição das propriedades mecânicas a baixas e altas temperaturas. Devido a este facto, a soldadura térmica é um método comum de união entre superfícies com este tipo de materiais.

O PP da Repsol apresenta um MFR (Melt Flow Rate) médio, sendo segundo a ficha técnica, especialmente formulado para processos de extrusão e adequado especificamente para a produção de filamento. Na Tabela 1 podem-se observar algumas propriedades deste material.

Tabela 1 Propriedades do ISPLEN® PP 040 C1E.

Propriedades	Valor	Unidade	Método
MFI	3.0	g/10 min	ISO 1133
Módulo à flexão	1800	MPa	ISO 178
Vicat (10N)	153	°C	ISO 306
Gama de processamento	190-250	°C	-

O PP reforçado da SOFTER, segundo o fabricante, apresenta excelentes propriedades mecânicas e foi aprovado para a indústria automóvel, elétrica, de ferramentas e outras. Este material é principalmente utilizado na indústria automóvel. Na Tabela 2 podem-se observar algumas propriedades deste material.

Tabela 2 Propriedades do POLIFOR L6 GF/30 NATURALE.

Propriedades	Valor	Unidade	Método
MFI	2.5	g/10 min	ISO 1133
Módulo à flexão	5500	MPa	ISO 178
Vicat (50N)	135	°C	ISO 306
Gama de processamento	190-230	°C	-

Como referido anteriormente, o PP homopolímero apresenta uma contração elevada e consequentemente as peças produzidas com este material não apresentam uma boa estabilidade dimensional. A escolha do PP reforçado com fibras de vidro visa, entre outros objetivos, reduzir a contração, melhorar a estabilidade dimensional e para além disso, aumentar a resistência mecânica e térmica. Este é o resultado esperado decorrente da utilização do PP reforçado.

3.2. Extrusão de filamento para FDM

Os monofilamentos foram produzidos numa extrusora monofuso Periplast (Figura 19) do DEP (Departamento de Engenharia de Polímeros). Acoplada a este equipamento, utilizou-se uma fieira com um orifício circular de diâmetro de 2 mm, projetada para a produção de monofilamento com 1.75 mm de diâmetro, adequado à impressora 3D utilizada neste estudo.

A extrusora foi inserida numa linha de extrusão constituída por três unidades de puxo e respetivos controladores. No laboratório de processamento do DEP estavam disponíveis soluções de equipamento para arrefecimento do filamento a água ou a ar.



Figura 19 Vista geral da linha de extrusão utilizada na produção dos filamentos.

Na extrusão do filamento não reforçado foi feita uma primeira abordagem com o arrefecimento a água. Foi utilizado um dispositivo que consiste num depósito com aberturas laterais circulares (Figura 20), em que a água circula em circuito fechado. Na ficha técnica do material é sugerido que se processe este tipo de PP numa gama de temperaturas dos 190 °C aos 250 °C. Na extrusora é possível definir a temperatura de 3 zonas, duas no cilindro e outra na cabeça de extrusão. Inicialmente foram definidos 190 °C para as duas zonas do cilindro e 230 °C para a cabeça de extrusão. Foi utilizada apenas a segunda unidade de puxo, de forma a manter um compromisso entre o nível de orientação do filamento e a uniformidade dimensional do mesmo.



Figura 20 Depósito de circulação de água.

Depois de extrudir algum filamento, constatou-se que o mesmo apresentava vazios no seu interior (Figura 21) e o achatamento era considerável. Por esse motivo, foi extrudido filamento, variando a gama de temperaturas e a utilização das diferentes unidades de puxo, mas apesar do achatamento ter diminuído, não foi possível eliminar os vazios. Este defeito poderia dever-se ao fato do arrefecimento ser mais rápido no exterior do filamento do que no interior do mesmo, o que provocava maior contração no interior, onde o arrefecimento era mais lento. Este efeito foi ampliado pela circunstância do PP ser um material semi-cristalino e por essa razão apresentar elevada contração.

Foi tomada a decisão de alterar o tipo de arrefecimento para arrefecimento a ar. Foi mantido o depósito de arrefecimento, passando a funcionar como reservatório de circulação forçada de ar.

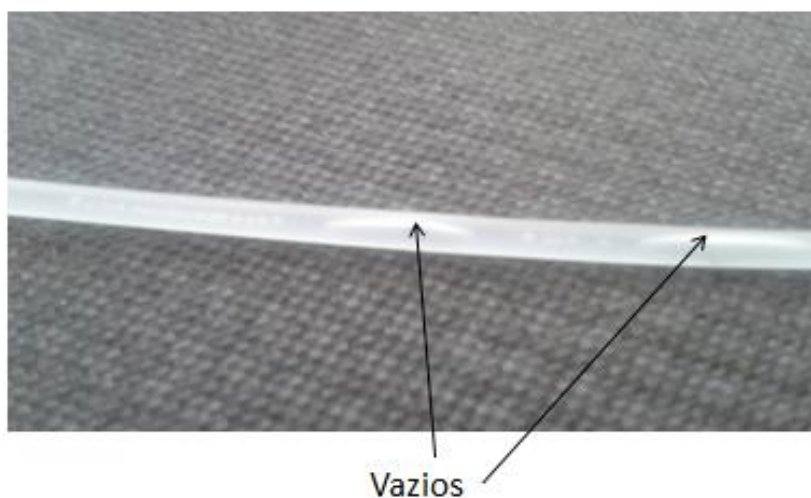


Figura 21 Vazios no filamento.

Foi necessário colocar no inferior do reservatório uma peça metálica para restringir o fluxo de ar direto em direção ao filamento. Este fluxo de ar era demasiado forte e acabava por quebrar o filamento na fase do arrefecimento. Na Figura 22 pode ver-se a posição desta peça no depósito de arrefecimento.

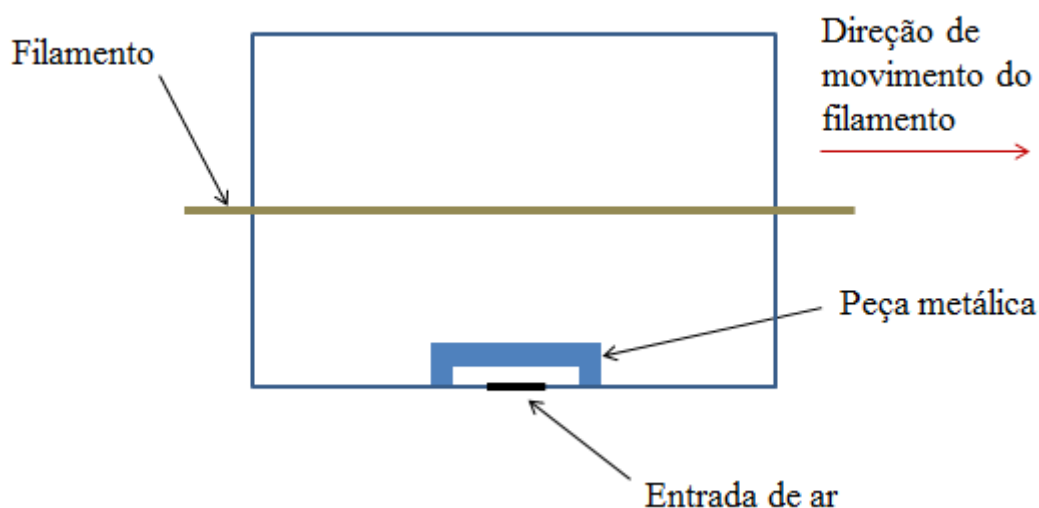


Figura 22 Esquema representativo da posição da peça metálica.

Com este tipo de arrefecimento o filamento produzido já não apresentava vazios e a secção transversal era mais uniforme. Procedeu-se então à otimização do processo para um diâmetro de filamento de 1.75 mm. É importante referir que na entrada do filamento na unidade de arrefecimento deve-se evitar o contacto do mesmo com as paredes do orifício circular desta unidade. Para que isto seja possível deve-se ajustar a altura da extrusora, assim como o alinhamento com a unidade de arrefecimento e consequentemente com toda a linha de extrusão. Como já referido, na unidade de puxo 1, o filamento não sofre estiramento e os rolos inferiores desta unidade servem apenas como suporte para o filamento. O estiramento é feito somente na unidade 2. Na unidade 2 foram colocados também, dois pentes, de forma a direccionar corretamente o filamento, impedindo que o mesmo se desviasse do percurso desejado e tornasse necessário recomeçar o processo. Na Figura 23 pode-se ver a disposição de todos os constituintes da linha de extrusão.

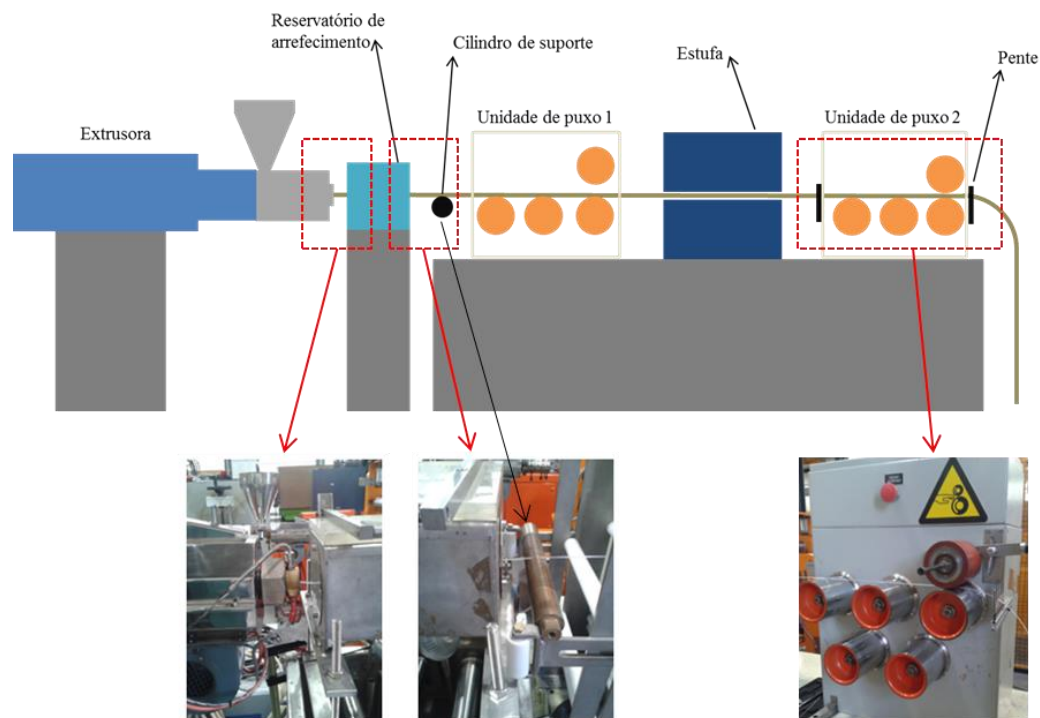


Figura 23 Esquema representativo da linha de extrusão utilizada.

A temperatura na estufa (temperatura de estiragem) foi igual à temperatura ambiente, uma vez que não foi realizada estiragem adicional. Na Tabela 3 encontram-se as condições de processamento.

Tabela 3 Condições de processamento (PP).

Condições de processamento (PP)	
Perfil de temperaturas da extrusora/cabeça (°C)	190/220/220
Velocidade de rotação do parafuso (rpm)	11
Velocidade dos rolos de puxo da unidade 2 (m/min)	7
Temperatura de estiragem (°C)	26
Distância saída da fieira/caixa de arrefecimento (cm)	3

No final da linha o filamento cai por ação da gravidade sobre uma superfície (foi utilizada uma folha de plástico) que o preserva dos contaminantes do solo. De seguida é enrolado de forma manual e armazenado em forma de rolos. Na Figura 24 pode ver-se um desses rolos.



Figura 24 Rolo de monofilamento (PP).

Em relação à extrusão do filamento reforçado, na ficha técnica deste material é sugerido que se processe numa gama de temperaturas desde os 190 aos 230 °C. Uma vez que estas temperaturas estão dentro da gama de temperaturas sugeridas para o PP não reforçado (190 a 250 °C), foi extrudido inicialmente filamento com as mesmas condições de processamento do PP não reforçado (190/220/220 °C). No entanto, verificou-se que o filamento extrudido se apresentava quebradiço na zona de arrefecimento, o que resultava na sua constante quebra nesta fase do processo. De forma a melhorar este aspeto, foram alteradas as temperaturas de processamento para 200/230/230 °C. Isto resultou numa maior flexibilidade do monofilamento e numa redução da quebra.

De seguida iniciou-se o processo de obtenção do filamento com o diâmetro desejado. Para este fim procurou-se um compromisso entre a velocidade de extrusão e a velocidade de rotação dos rolos. Verificou-se que para este material a velocidade de extrusão não poderia ser muito elevada (relativamente ao PP), de forma a evitar a quebra do filamento. Para além deste aspeto foi necessário acoplar à linha um dispositivo que tinha como fim criar fricção com o filamento, entre a fieira e os rolos de puxo em uso (unidade de puxo 2), de forma a reduzir a força atuante sobre o filamento na zona de arrefecimento. Na Figura 25 pode ver-se a posição deste dispositivo na linha de extrusão, assim como as forças atuantes no filamento.

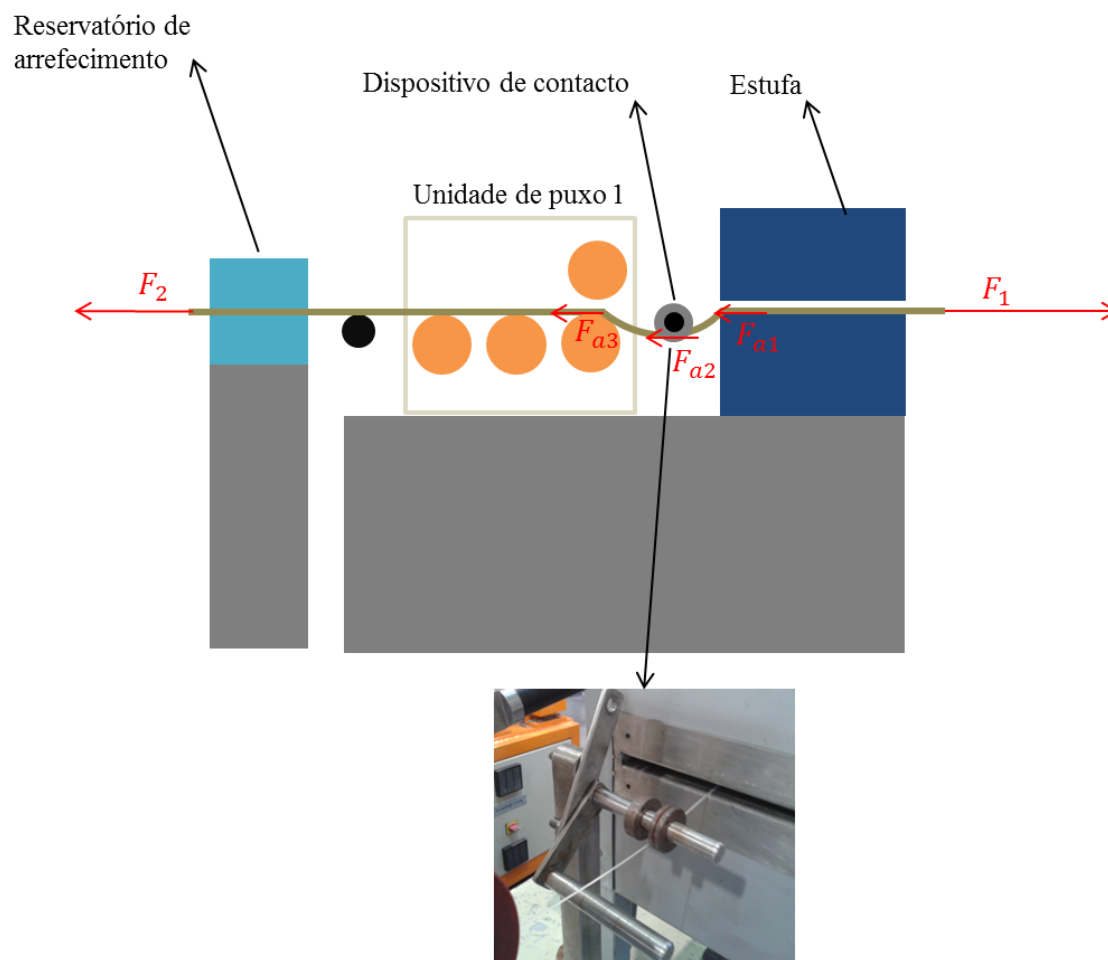


Figura 25 Esquema representativo da posição do dispositivo de contacto e das forças atuantes no filamento.

Este dispositivo flete o filamento, proporcionando três zonas de fricção e consequentemente três forças de atrito (F_{a1} , F_{a2} , F_{a3}), que fazem com que a força atuante na zona de arrefecimento (F_2) seja mais baixa. Sem a colocação deste dispositivo, a força atuante na zona de arrefecimento seria igual a F_1 . Desta forma, o estiramento na zona de arrefecimento é mais moderado, evitando assim a quebra. Para além da colocação do dispositivo de contacto, o processo de extrusão do filamento de GRPP foi semelhante ao do PP. O filamento foi novamente enrolado manualmente, procurando não o contaminar. Na Tabela 4 encontram-se as condições de processamento do monofilamento de GRPP.

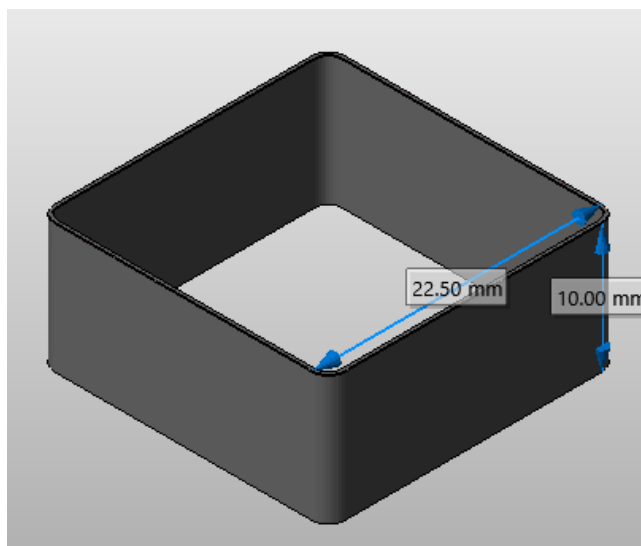
Tabela 4 Condições de processamento (GRPP).

Condições de processamento (GRPP)	
Perfil de temperaturas da extrusora/cabeça (°C)	200/230/230
Velocidade de rotação do parafuso (rpm)	6.3
Velocidade dos rolos de puxo da unidade 2 (m/min)	5
Temperatura de estiragem (°C)	26
Distância saída da fieira/caixa de arrefecimento (cm)	4.5

3.3. Produção de amostras

3.3.1. Impressão 3D dos componentes por FDM

Não existindo muita informação em relação à impressão com PP e especificamente com PP homopolímero, foram feitos testes para avaliar e determinar as melhores condições para a impressão com este material. Começou-se por fazer a impressão do objeto representado na Figura 26.

**Figura 26** Caixa de paredes finas (Netfabb).

Este objeto faz parte de um conjunto de ficheiros usados com o objetivo de calibrar os equipamentos. Dada a reduzida espessura das suas paredes, esta caixa pode ser construída com apenas um filamento de espessura. A espessura do mesmo é de

0.25 mm, o que é impossível de obter com um nozzle de 0.4 mm, pois a largura mínima de um filamento depositado nunca pode ser inferior ao diâmetro do nozzle. Quando se importa o ficheiro STL para o Slic3r e se define as condições da impressão, este, no código G, assume a espessura da caixa como o mínimo permitido pelo nozzle, isto é, 0.4 mm.

A primeira impressão foi realizada com uma temperatura do bico de 165 °C, esta temperatura foi encontrada depois de extrudir algum material e verificar visualmente a qualidade do filamento extrudido. No entanto esta temperatura não era a temperatura real no interior do bico, uma vez que em impressões anteriores, realizadas com outros materiais (PLA e ABS), verificou-se que a temperatura utilizada e registada pelo sensor de temperatura no bico era em média 30 °C inferior à temperatura sugerida para estes materiais. Este erro de leitura deve-se ao mau isolamento térmico do sensor de temperatura e ao arrefecimento provocado pelo ventilador na zona de leitura. Assim, quando foram definidos 165 °C, a temperatura real no interior do bico deveria ser de aproximadamente 195 °C. Foi escolhido como cama um vidro revestido com fita de pintura (Figura 27). Este vidro encontra-se fixado à cama original através de 4 pinças.

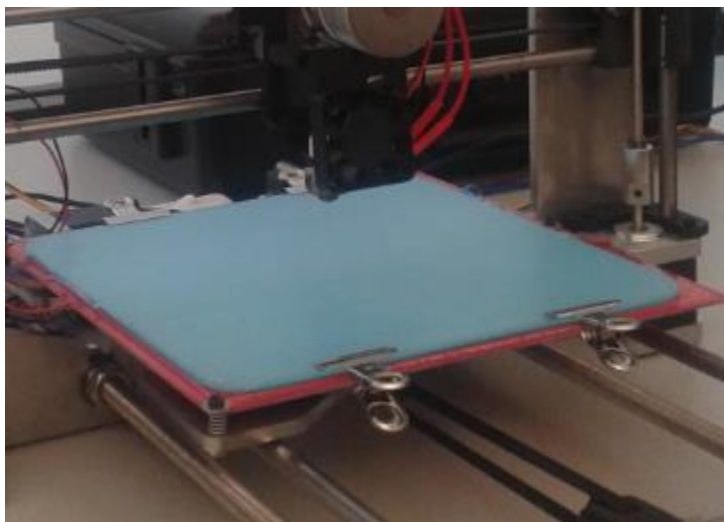


Figura 27 Cama de vidro revestido com fita de pintura.

Este revestimento é muito utilizado na impressão 3D, funcionando especialmente bem com o PLA. A temperatura da cama foi definida para 0 °C, o que no software (Slic3r) representa a temperatura ambiente. Após a impressão verificou-se que a peça encurvou na base, sendo este encurvamento mais proeminente nos cantos (Figura 28).

Este resultado sugere que a contração do material é muito elevada e ao mesmo tempo a adesão à cama é insuficiente.

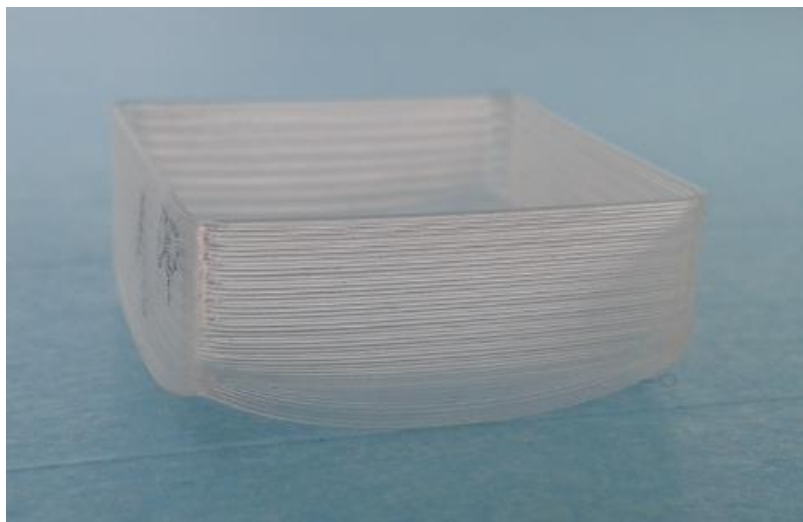


Figura 28 Encurvamento da 1ª impressão.

Para materiais como o PLA e o ABS são sugeridas para temperatura da cama 60 °C e 110 °C, respetivamente. Foi tomada a decisão de usar uma temperatura da cama de 60 °C e realizar uma nova impressão. Verificou-se que a adesão diminuiu, tendo a impressão sido cancelada logo na fase inicial, pois a primeira camada depositada não aderiu em nenhum ponto. Aumentou-se, então, a temperatura da cama para os 80 °C e a adesão voltou a ser nula. Atendendo a estes resultados, o aumento da temperatura da cama foi posto de parte para resolver o problema da adesão deste material à cama, com este tipo de revestimento.

De seguida tentou-se a abordagem de utilizar a ferramenta “Draf”. Esta opção do Slic3r permite construir camadas de suporte na base das peças, o que normalmente faz com que a adesão aumente. Foram testadas impressões variando a quantidade de camadas de suporte, mas no entanto, apesar da adesão à cama ter melhorado ligeiramente, a adesão entre o suporte e o objeto propriamente dito não foi satisfatória.

Foram feitas então várias impressões testando o efeito da variação da altura da camada, largura do filamento e velocidade de deposição na 1ª camada. Na Figura 29 pode ver-se um esquema representativo dos parâmetros altura da camada e largura do filamento. Como já referido anteriormente, foi utilizada para as primeiras impressões uma altura de camada standard, definida pelo software. Esta largura corresponde a 200 % da altura da camada utilizada (0.2 mm), isto é, 0.4 mm. Quando, no software se

aumenta este valor, para 230 %, por exemplo, a largura da camada será de 0.46 mm. O Slic3r varia a largura da camada efetuando correções constantes ao débito de material extrudido. Para uma largura de camada maior, maior terá que ser o débito, uma vez que o material é pressionado contra a cama. A velocidade de deposição é a velocidade a que se move a cabeça de impressão e consequentemente o bico.

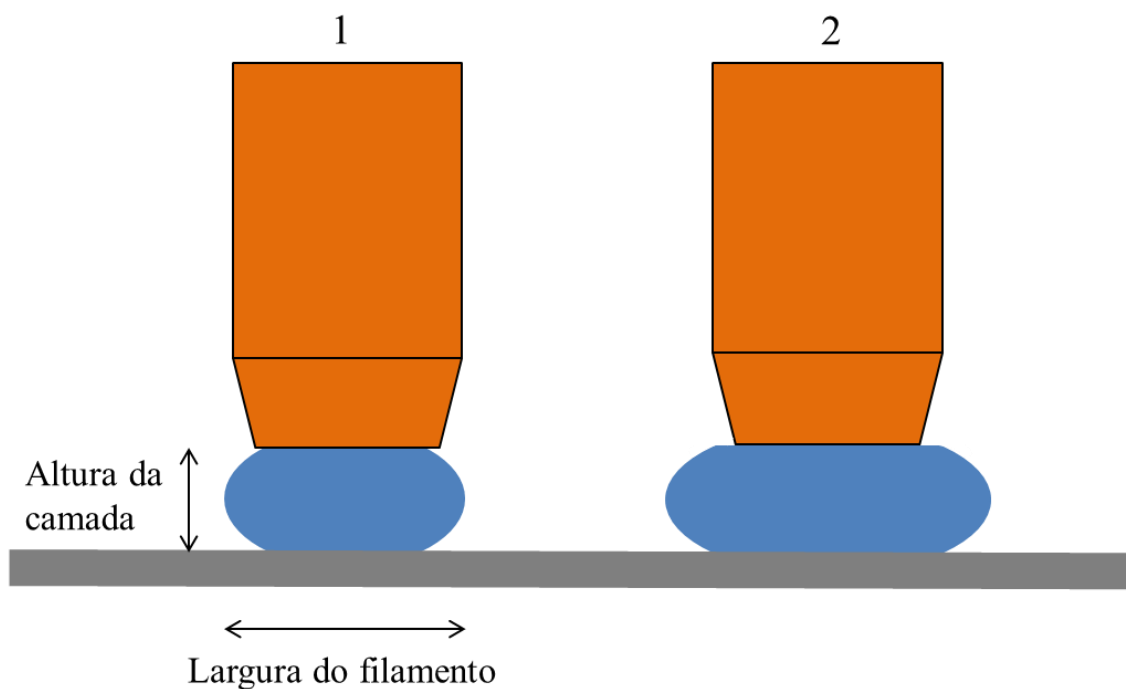


Figura 29 Esquema representativo dos parâmetros: altura da camada e largura do filamento (1 - largura standard; 2 - largura superior).

Verificou-se que a largura do filamento e a espessura da camada não tinham influência na adesão, mas a adesão aumentou para velocidades de deposição baixas (8 mm/s), quando a velocidade standard estava definida nos 20 mm/s. Apesar de esta alteração ter surtido efeitos positivos continuou a haver algum encurvamento e impressões canceladas.

Tomou-se então a decisão de testar novas superfícies para a cama. Testou-se vidro revestido com cola UHU Stic, mas a adesão foi quase nula. Foi testado também vidro com fita-cola de dupla face, no entanto a adesão foi inexistente.

Surgiu então a ideia de utilizar placas moldadas por compressão em PP (o mesmo material). Estas placas foram fixadas à cama original do equipamento através de fita-cola de dupla face, como se pode observar na Figura 30.

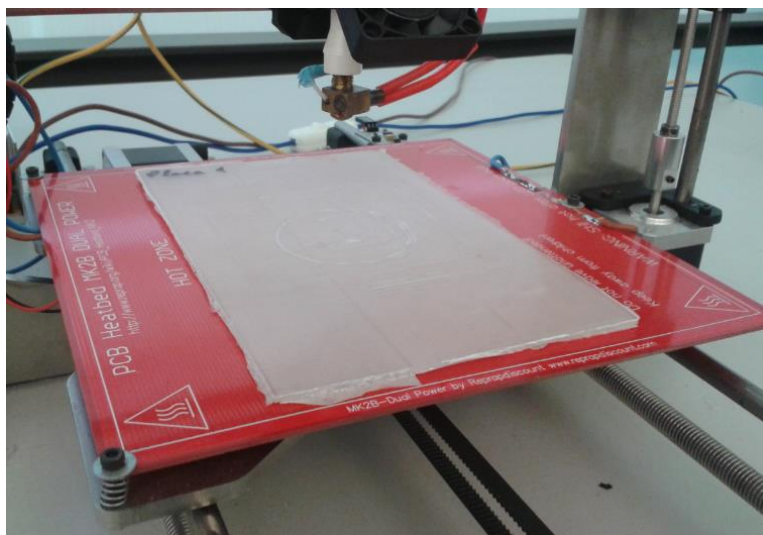


Figura 30 Cama de placa de PP.

Esta solução baseia-se no conceito de soldadura térmica, uma solução para a adesão de superfícies de PP. Atendendo à baixa energia superficial do PP, a soldadura térmica é uma das poucas formas de obter a desejada adesão. Foram, para este fim, moldadas por compressão placas com 2 mm de espessura. Depois de realizadas impressões variando os parâmetros que já haviam sido testados com a superfície de fita de pintura, verificou-se que a adesão aumentou consideravelmente e que uma velocidade de construção da 1ª camada baixa era o fator decisivo para a obtenção de uma boa adesão.

A fim de melhorar ainda mais o fator adesão foram testadas alterações superficiais nas placas moldadas por compressão. Estas alterações estão representadas nas Figuras 31 e 32.



Figura 31 Placa riscada com x-ato.

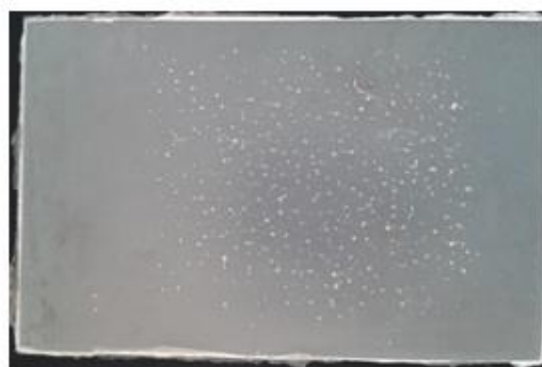


Figura 32 Placa com rugosidades.

Uma das placas foi riscada com um x-ato formando um padrão cruzado de 0/90°. A utilização desta superfície revelou que o material depositado se infiltrava nos entalhes criados pelo x-ato, aumentando assim a adesão nestas zonas. Verificou-se também que a orientação de deposição influenciava a adesão com esta superfície. Orientações de deposição paralelas aos entalhes aumentaram ligeiramente a adesão. No entanto a utilização de uma superfície riscada com x-ato faz com que a adesão não seja equilibrada por toda a base da peça, provocando boa adesão nos entalhes e fraca adesão nas zonas lisas. As placas com rugosidades foram moldadas num processo em que se utilizou uma folha de Teflon furada manualmente. As folhas de Teflon são utilizadas na moldação por compressão para facilitar a desmoldagem das peças, sendo utilizadas duas (neste caso foi furada uma delas). Esta solução não revelou ter qualquer efeito na adesão.

A melhor superfície para a cama, em termos de adesão, foi a de placas de PP raspadas com uma escova de aço e posteriormente limpas com álcool. Esta solução baseia-se na usada em soldadura térmica do polipropileno, onde as superfícies devem ser lixadas anteriormente. Estas placas facultam uma adesão forte e uniforme por toda a base das peças. Verificou-se também que velocidades baixas de deposição de 1ª camada proporcionavam melhor adesão, daí que se tenha utilizado a velocidade de 8 mm/s para a construção da peça. Na Figura 33 pode-se observar a peça construída sobre esta superfície com uma velocidade de deposição de 1ª camada de 8 mm/s.



Figura 33 Objeto imprimido sobre placa de PP.

De forma a testar a impressão com GRPP foi inicialmente encontrada a temperatura do bico, da mesma forma que no PP. A temperatura encontrada foi de 185 °C. Foi feita uma primeira impressão com velocidade de construção da 1ª camada de 8 mm/s, sobre uma placa de PP homopolímero. A meio da construção do objeto o bico entupiu e foi cancelada a impressão. Reduziu-se a velocidade de deposição das outras camadas para 8 mm/s (a velocidade era de 60 mm/s) e realizou-se uma nova impressão. Desta forma, a impressão realizou-se com sucesso, o objeto aderiu perfeitamente à cama e não se verificou encurvamento (Figura 34).

Dada a baixa contração observada naquelas condições de impressão, fez-se a impressão do mesmo objeto sobre vidro revestido com fita de pintura e observou-se que a adesão não foi tão forte quanto tinha sido sobre a placa de PP. Aumentou-se a temperatura da cama para 80°C e verificou-se que a adesão tinha aumentado e o encurvamento era quase nulo. Concluiu-se, assim, que a impressão deste objeto com GRPP podia ser feita tanto sobre placas de PP, como sobre vidro revestido com fita de pintura.



Figura 34 Objeto imprimido com GRPP sobre placa de PP.

É importante referir também que na impressão com GRPP é necessário ter particular atenção ao nivelamento da cama de forma a evitar o entupimento do bico. Em zonas em que o bico se encontra mais perto da cama, a extrusão do filamento é bloqueada devido à elevada viscosidade do PP reforçado quando comparando com o PP não reforçado.

A Tabela 5 resume as condições ótimas para impressão com os dois tipos de materiais.

Tabela 5 Condições de impressão ótimas.

Condições	PP	GRPP
Cama	Placa de PP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Placa de PP ▪ Vidro + fita de pintura
Temperatura do bico	165 °C	185 °C
Temperatura da cama	0 °C	0 °C (placa de PP) 80 °C (vidro + fita de pintura)
Velocidade de deposição da 1ª camada	8 mm/s	8 mm/s
Velocidade geral	60 mm/s	8 mm/s

Depois de definidas as condições de processamento ótimas para a impressão 3D com os dois materiais, foram produzidos provetes de tração (para ensaios de tração e avaliação morfológica) e peças para avaliação estética e dimensional.

Os provetes foram construídos segundo as dimensões nominais da norma DIN 53504-S3a (Figura 35).

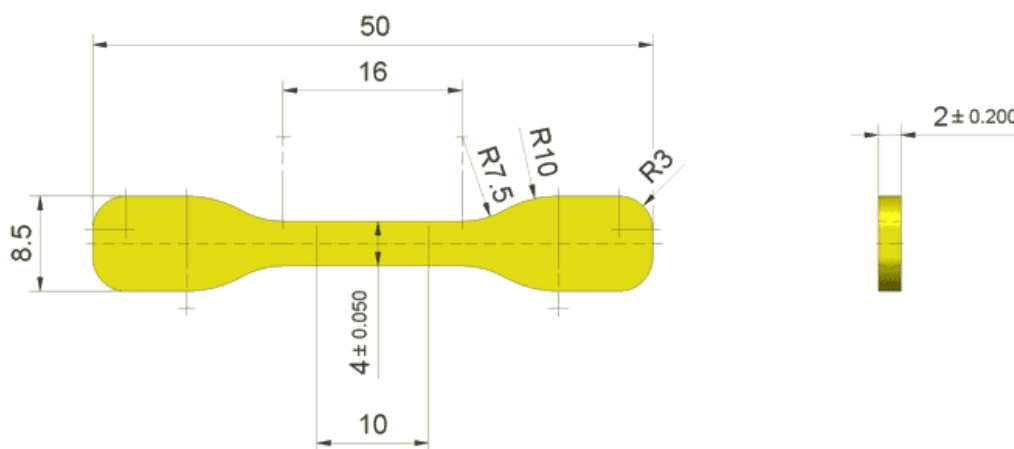


Figura 35 Dimensões nominais dos provetes da norma DIN 53504-S3a (mm) [11].

Este tipo de provetes tem a vantagem do seu reduzido tamanho, uma vez que o processo de impressão 3D é relativamente lento. Para além deste aspeto, no DEP existem as ferramentas para criar provetes deste tipo, produzidos por moldação por compressão. Desta forma será possível comparar o desempenho mecânico dos provetes fabricados pelas duas técnicas.

Foram construídos provetes por FDM variando graus de enchimento, orientação de deposição e altura da camada. O software de geração de código G utilizado (Slic3r), permite variar estes parâmetros, entre outros. A possibilidade de produzir peças com graus de enchimento inferiores a 100 % permite que se possam fazer impressões mais rapidamente e ao mesmo tempo com poupança de material. É importante perceber a resistência mecânica que se perde com a diminuição dos graus de enchimento.

Estudos anteriores demonstraram que diferentes orientações de deposição proporcionavam diferentes resistências à tração. Seria interessante estudar de que forma estas diferenças se verificam no Polipropileno. As orientações estudadas serão as de 0°, 45° e 90°. Serão também estudadas soluções que alternam camadas com duas orientações de deposição distintas. Em relação à altura da camada, este parâmetro torna-se importante, pois reduzindo o seu valor aumenta-se a resolução das peças. Escolheu-se uma altura de camada de 0.2 mm, valor sugerido pelo software, e uma altura de 0.35 mm que é o valor máximo recomendado para bicos de 0.4 mm. Este valor é mais baixo que o diâmetro do bico, pois quando se deposita filamento este adere à camada anterior, sendo que parte do filamento depositado ocupa o espaço ocupado pela camada anterior, reduzindo a altura da última camada depositada. Na Tabela 6 podem ver-se os parâmetros e os valores adotados para cada um deles.

Tabela 6 Parâmetros estudados e valores adotados.

Parâmetros estudados	Valores adotados
Graus de enchimento (%)	20/60/100
Orientação	45°/0°/90°
Altura da camada (mm)	0.2/0.35

De forma a estudar de uma forma equilibrada todos estes parâmetros foi escolhida uma condição padrão. Neste estudo, a condição padrão é um provete, em PP, construído com grau de enchimento de 100 %, uma orientação cruzada de 45° e altura da camada de 0.2 mm.

O grau de enchimento escolhido para padrão é aquele que teoricamente proporciona peças com melhores propriedades mecânicas, mais próximas dos provetes produzidos por tecnologias convencionais. A orientação cruzada de 45° e a altura de camada de 0.2 mm são as condições padrão do software Slic3r e esta foi a razão da sua escolha. Outro parâmetro importante para o FDM é a largura do filamento depositado; esta foi definida em 0.4 mm (diâmetro do bico) para todos os provetes. A opção padrão do Slic3r consiste em deixar que o software calcule automaticamente a largura do filamento, tendo em conta as dimensões das peças. Para garantir que este parâmetro se mantinha inalterado em todos os provetes, foi definida a largura de 0.4 mm.

Os provetes construídos por FDM são de nove tipos, o que perfaz, com seis provetes produzidos de cada tipo, um total de 54 provetes. A Tabela 7 resume a informação relativa aos provetes testados:

Tabela 7 Designação dos provetes testados.

Parâmetros	Provetes
Padrão	C45°/H0.2/100%
Orientação	0°/H0.2/100%
	90°/H0.2/100%
	45°/H0.2/100%
	C0°/90°/H0.2/100%
Altura de camada	C45°/H0.35/100%
Grau de enchimento	C45°/H0.2/20%
	C45°/H0.2/60%
Adição de reforços	FV/C45°/H0.2/100%

Na designação dos provetes, o primeiro campo refere-se à orientação, o segundo à altura da camada e o último ao grau de enchimento. No caso dos provetes que começam

com o campo FV, estes referem-se aos provetes em GRPP. Na Figura 36 pode ver-se de que forma foi feita a designação para os provetes padrão.

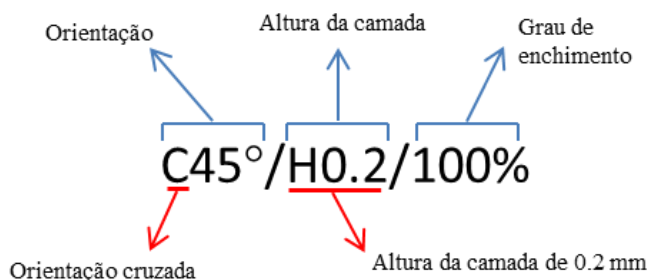


Figura 36 Designação dos provetes padrão.

Para avaliar o efeito da orientação, foram impressos em PP cinco tipos de provetes, com as condições consideradas ótimas, referidas na Tabela 5. Os provetes construídos para avaliar este parâmetro foram:

- Provetes cruzados a 45°, altura da camada de 0.2 mm e 100 % de enchimento (padrão).

Na Figura 37 pode-se ver a orientação de deposição deste tipo de provete. De referir que esta imagem foi retirada do software Pronterface e respeita a um enchimento de 60 %. Esta serve apenas para se ter uma noção da orientação, uma vez que para um enchimento de 100 % o software não reconhece o espaçamento entre filamentos. Neste provete a orientação das camadas construídas intercala entre + 45° e - 45°.

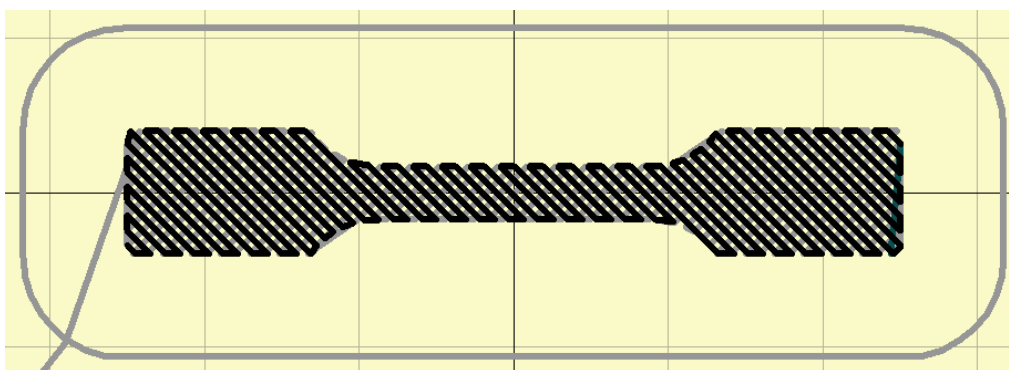


Figura 37 Orientação de deposição dos provetes do tipo C45°/H0.2/100% (padrão).

- Provetes depositados a 0°, altura da camada de 0.2 mm e 100 % de enchimento.

Nestes provetes a orientação de deposição não se altera de camada para camada, ao contrário daquilo que é um padrão do software Slic3r. Devido a este facto foi necessário alterar o código G gerado pelo software. Foi inicialmente gerado um código referente a uma orientação cruzada de 0°/90°, depois fez-se a abertura deste ficheiro no Software Pronterface. Neste último software existe uma ferramenta de edição de código G (edit), que foi utilizada para alterar o mesmo. Uma vez na edição é possível verificar que para cada camada existem inúmeras linhas de comando referentes a velocidades de deposição, quantidade de filamento depositado e direções de deposição. Quando concluída cada camada, existe uma linha de comando que faz com que o bico suba a altura de uma camada (0.2 mm neste caso). Assim e depois de identificar estas linhas específicas é possível saber quando começam e acabam as linhas de comando para cada camada. O que foi feito de forma a ter todas as camadas iguais foi apagar as linhas de comando para todas as camadas, exceto para a primeira. Depois copiaram-se as linhas referentes à primeira camada e colaram-se no seguimento destas. Como cada camada começa com a indicação da altura do bico e na construção da 1ª camada a altura do bico é de 0.2 mm, foi alterada esta altura para 0.4 mm no início da segunda linha. Repetiu-se este processo até aos 2 mm de altura, valor que representa a espessura dos provetes. Na Figura 38 pode ver-se um esquema deste processo, para a criação das linhas de comando da 2ª camada.

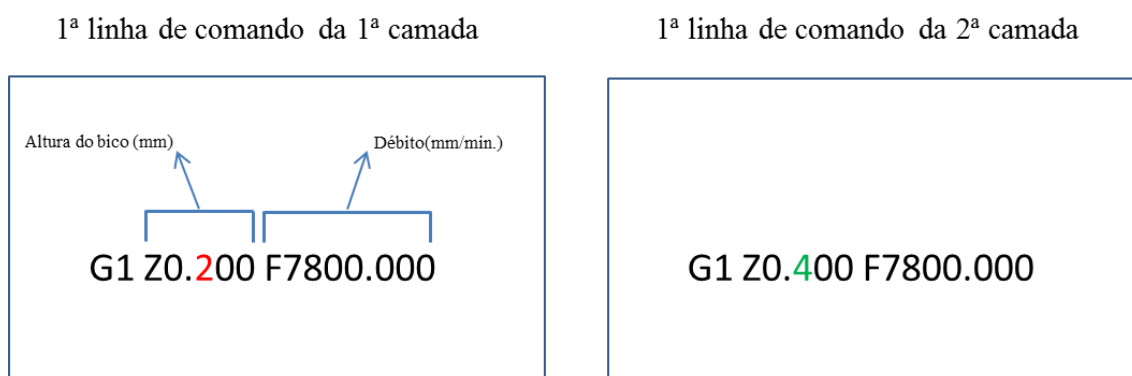


Figura 38 Primeiras linhas de comando da 1ª e 2ª camada. A vermelho, o valor eliminado na linha da 2ª camada; a verde, o valor na 2ª camada.

Na Figura 39 é possível avaliar a orientação dos provetes deste tipo. De referir que as linhas azuis representam movimentos do bico, durante os quais não existe extrusão.

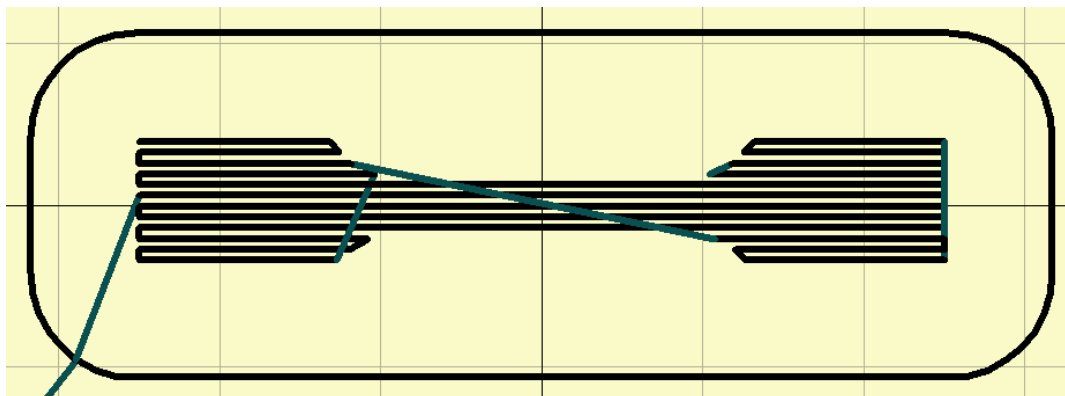


Figura 39 Orientação de deposição dos provetes do tipo 0°/H0.2/100%.

- Provetes depositados a 90°, altura da camada de 0.2 mm e 100 % de enchimento.

Estes provetes apresentam as camadas todas iguais, à semelhança dos provetes produzidos com 0°. Na construção destes provetes seguiu-se um processo semelhante aos de 0°. A única diferença é que o código G gerado pelo Slic3r continha comandos para a construção de provetes com uma orientação de 90°/0°. Isto quer dizer que a primeira camada tinha uma orientação de 90°. Foram as linhas de comando desta camada que foram copiadas e coladas, o que resultou em provetes com orientação de 90° em todas as camadas, como se pode constatar na Figura 40.

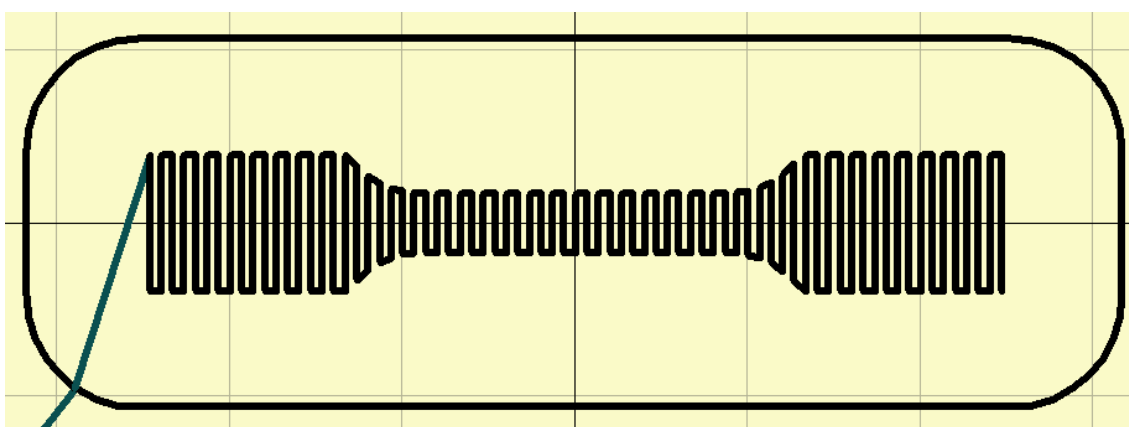


Figura 40 Orientação de deposição dos provetes do tipo 90°/H0.2/100%.

- Provetes com deposição a 45° (Figura 41), altura da camada de 0.2 mm e 100 % de enchimento.

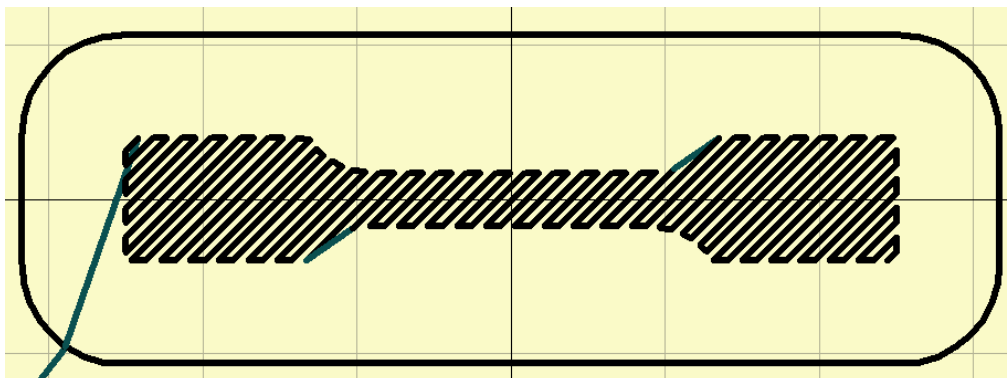


Figura 41 Orientação de deposição dos provetes do tipo 45°/H0.2/100%.

À semelhança dos dois anteriores, todas as camadas apresentam a mesma orientação de deposição, neste caso de 45°. Também foi necessário o processo de alteração do Código G.

- Provetes com deposição cruzada a 0°/90 (Figura 42), altura da camada de 0.2 mm e 100 % de enchimento.

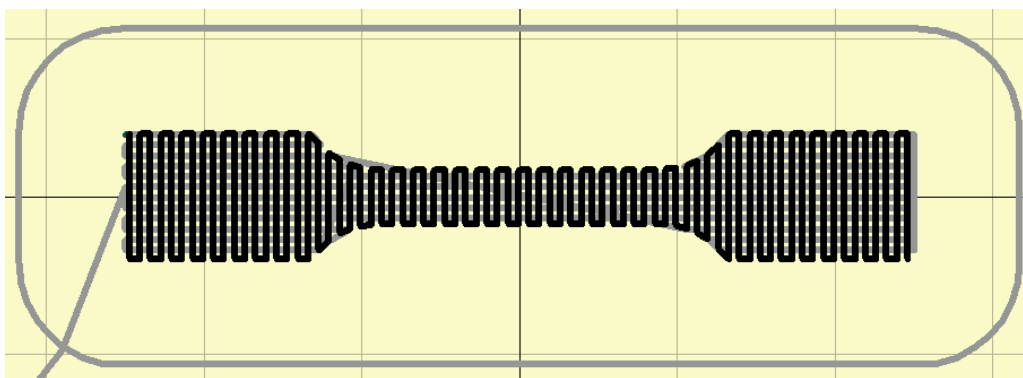


Figura 42 Orientação de deposição dos provetes do tipo C0°/90°/H0.2/100%.

Este tipo de provetes apresenta camadas intercaladas com deposições de 0° e 90°. Neste caso não foi necessário editar o código G, uma vez que esta é uma das deposições padrão do Slic3r.

Os provetes anteriores foram construídos de forma a avaliar a influência da orientação de deposição. Para avaliar o efeito da altura da camada nas propriedades mecânicas e uma vez que já foi contemplada a construção dos provetes C45°/H0.2/100% (provetes padrão), resta referir a construção de provetes com uma deposição cruzada de 45°, altura da camada de 0.35 mm e 100 % de enchimento. A produção destes últimos (C45°/H0.35/100%) foi semelhante à dos provetes padrão, sendo necessário apenas alterar no Slic3r a altura da camada para 0.35 mm.

Em relação à avaliação da influência dos graus de enchimento, foram construídos provetes com uma orientação cruzada de 45°, altura da camada de 0.2 mm e graus de enchimento de 20 %, 60 % e 100 %. Os de 100 % já foram referidos (provetes padrão). Os provetes com graus de enchimento de 20 % e 60 % foram construídos de uma forma muito semelhante aos de 100 %. Foi necessário alterar o grau de enchimento no Slic3r e acionar a opção “perimeters”. Esta opção faz com que seja depositado filamento no exterior das peças (em seu redor), fornecendo apoio em caso de graus de enchimento inferiores a 100 % e proporcionando um melhor acabamento superficial. É possível adicionar vários perímetros, sendo que neste estudo escolheu-se a adição de apenas um perímetro, de forma a não influenciar em demasia os resultados finais dos ensaios de tração. Na Figura 43 pode ver-se a orientação de deposição destes provetes e constatar a presença do perímetro.

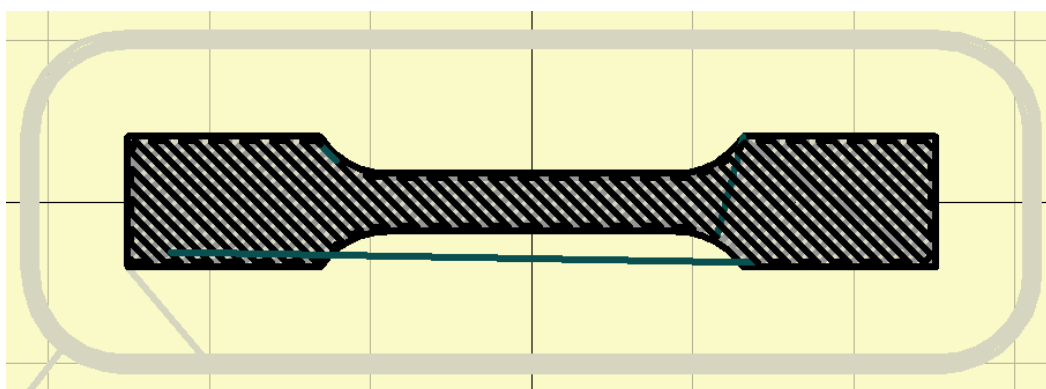


Figura 43 Orientação de deposição dos provetes do tipo C45°/H0.2/ (20 % e 60 %).

Foram produzidos também provetes para avaliar a influência da adição de reforços. Para este fim foram produzidos provetes com GRPP, usando os parâmetros padrão e seguindo as condições consideradas como ótimas indicadas na Tabela 5. Para a

construção de provetes com este material optou-se pela cama de vidro revestido com fita de pintura, uma das opções possíveis. Estes provetes têm a seguinte designação: FV/C45°/H0.2/100%.

Nas Figuras 44 e 45 podem ver-se provetes construídos com PP (0°/H0.2/100%) e GRPP (FV/C45°/H0.2/100%).

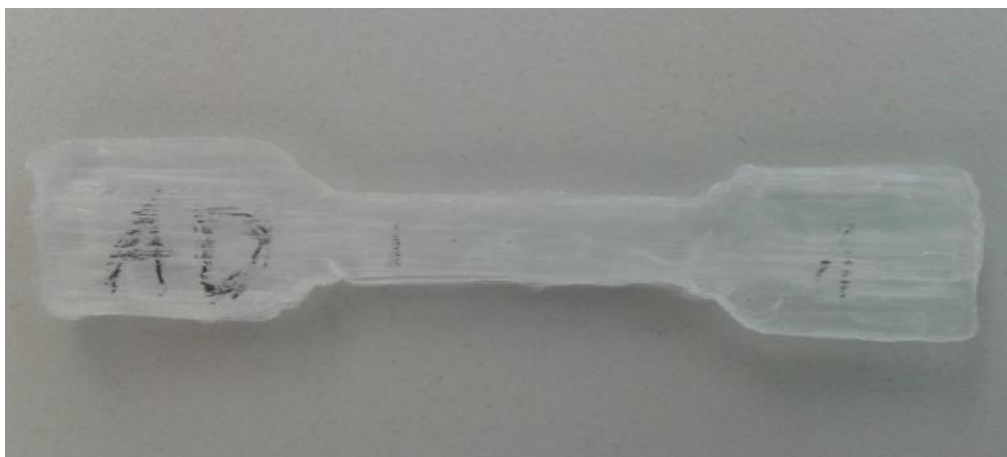


Figura 44 Provete do tipo 0°/H0.2/100%.

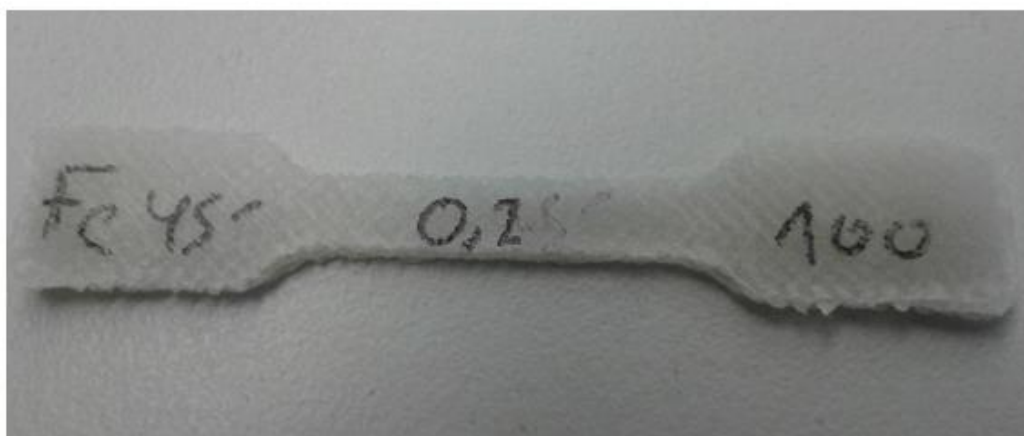


Figura 45 Provete do tipo FV/C45°/H0.2/100%.

Para avaliação estética e dimensional foi produzido outro tipo de peças, as quais fazem parte do grupo de peças utilizadas para calibrar os equipamentos. Consistem em dois objetos, sendo que o mais pequeno deve encaixar na abertura do maior, não deixando qualquer tipo de folga. Na Figura 46 podem ver-se esses objetos.

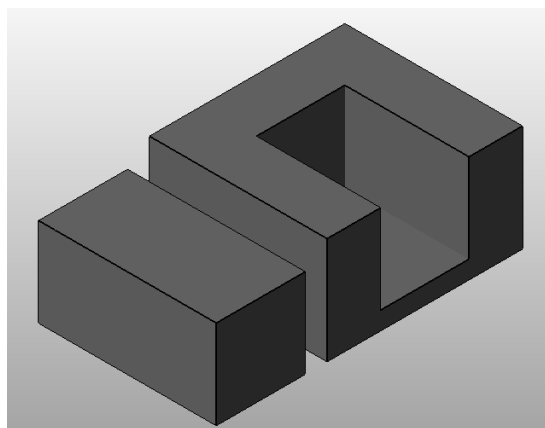


Figura 46 Peças a produzir para avaliação estética e dimensional (Netfabb).

O objetivo da avaliação dimensional é perceber como se comportam, em termos dimensionais, as peças construídas com os dois materiais estudados. Dada a elevada contração demonstrada pelo PP, é interessante saber com que intensidade este fator melhora com a adição de reforços. A avaliação estética visa observar as diferenças entre as peças construídas com os dois materiais, com foco no acabamento superficial e defeitos.

Para este fim foram impressos três conjuntos iguais aos da Figura 46 para cada material. As condições utilizadas na produção das peças foram as consideradas ótimas, especificadas na Tabela 5. Os parâmetros utilizados foram os parâmetros padrão definidos na produção dos provetes (deposição cruzada a 45°, altura da camada de 0.2 mm e 100 % de enchimento), mas com a adição de dois perímetros com o objetivo de melhorar o acabamento superficial. Na Figura 47 pode-se constatar a presença destes perímetros, numa imagem retirada do Pronterface.

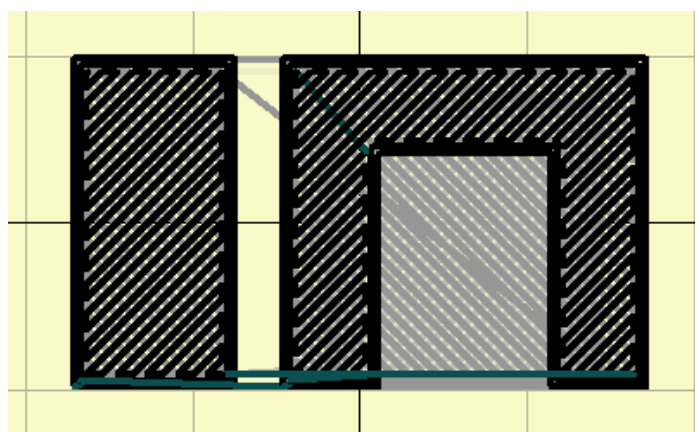


Figura 47 Esquema de impressão ($z = 2.2$ mm).

Na construção das peças com PP surgiu um problema que não tinha aparecido nas impressões feitas anteriormente. A maior quantidade de material utilizado na construção destes conjuntos fez com que aumentasse a quantidade de calor na superfície da cama, que originou que a placa de PP, utilizada como cama, tenha empenado durante as impressões. Devido a este empeno a placa descolou-se da base original do equipamento. Na Figura 48 pode ver-se esquematizado este processo de empenamento.

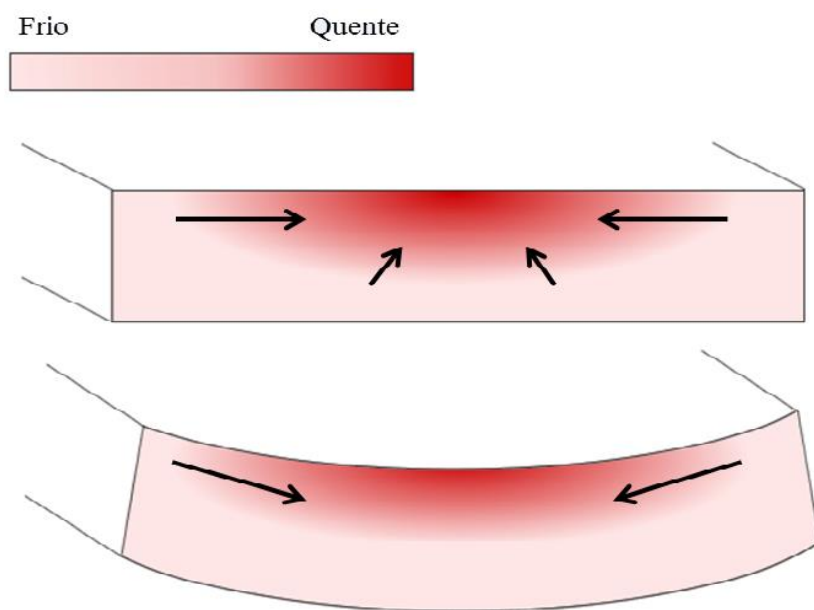


Figura 48 Processo de empenamento das placas de PP.

Através deste esquema é possível perceber que a superfície superior se encontra mais quente em relação à superfície inferior. É esta diferença de temperaturas que faz com que as placas empenem e descolem na periferia das mesmas. Para contrariar este empeno optou-se por colar a placa de PP a uma placa de vidro, com fita-cola de dupla face. Desta forma a placa de PP fica colada a uma superfície mais rígida. Para reforçar usou-se ainda fita-cola externamente, para promover maior adesão entre a placa de PP e a placa de vidro (Figura 49). Estas alterações permitiram obter bons resultados e foi desta forma que foram construídos os conjuntos em PP.

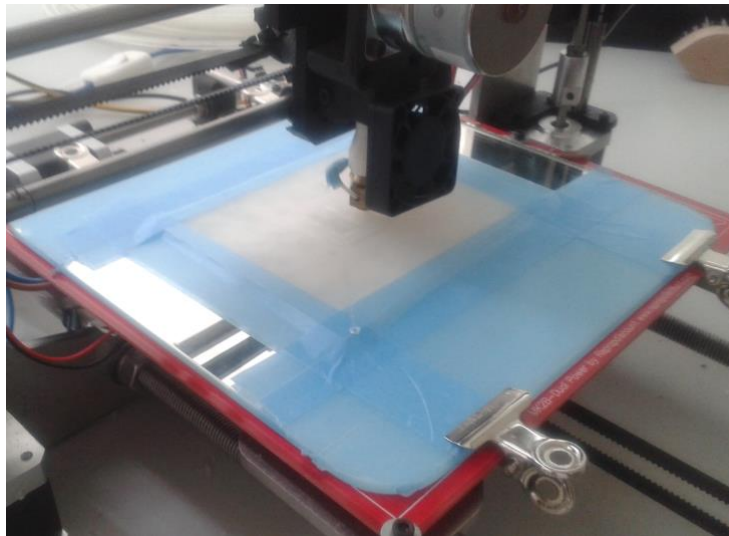


Figura 49 Solução adotada para impressão dos conjuntos em PP.

3.3.2. Moldação por compressão

Para comparação com os provetes produzidos por impressão 3D, foram produzidos provetes através da técnica de moldação por compressão. Os provetes de moldação por compressão apresentam as mesmas dimensões que os anteriores (dimensões nominais da norma DIN 53504-S3a).

Para a obtenção destes provetes, começou-se por produzir placas com a espessura de 2 mm (espessura dos provetes). O processo de produção das placas começa pela montagem representada em parte na Figura 50.

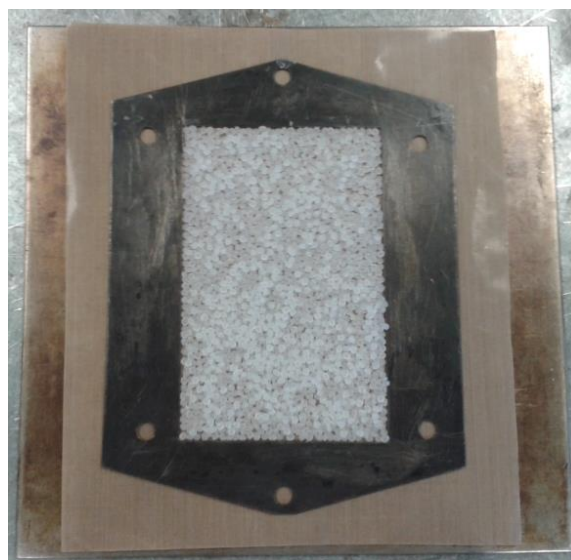


Figura 50 Imagem da montagem parcial.

Coloca-se sobre uma placa metálica uma folha de Teflon, de seguida coloca-se uma moldura que dá a forma ao produto final e enche-se a sua cavidade com grânulos de material. A montagem fica completa com outra folha de Teflon e a outra placa metálica semelhante à primeira referida.

O equipamento utilizado foi uma das prensas Moore do DEP, prensa 1 (Figura 51). No caso do PP, começou-se por ligar o equipamento e definir a temperatura dos pratos para 230 °C (uma temperatura intermédia em relação à gama de temperaturas de processamento indicadas pelo fabricante do material); de seguida colocou-se o conjunto na prensa. Aproximaram-se os pratos do conjunto de forma a estarem apenas encostados e esperou-se 2 minutos. A seguir estabeleceu-se a pressão nas 10 toneladas e esperou-se 10 minutos. No final desligou-se o aquecimento, abriu-se a água para o arrefecimento e esperou-se que os pratos arrefecessem até aos 80 °C, temperatura a que se consegue desmoldar a placa sem empenamento. Este valor foi encontrado por tentativa-e-erro, até ter moldações sem empeno.



Figura 51 Prensas de compressão Moore.

O corte dos provetes realizou-se recorrendo a um cortante. Sobre uma placa de madeira colocou-se a placa de PP e sobre esta o cortante (Figura 52). Este conjunto foi colocado na prensa 2, cujos pratos se encontravam à temperatura de 80 °C (diminuindo a rigidez da placa e facilitando o corte). Cada provete foi cortado efetuando pressão

sobre o conjunto, até que se observasse a separação total do provete. Neste estudo, estes provetes têm a seguinte designação: M/COMP.



Figura 52 Conjunto para o corte dos provetes.

Em relação ao GRPP, foi inicialmente produzida uma placa com temperatura dos pratos de 210 °C (temperatura intermédia em relação às condições de processamento indicadas pelo fabricante) e mantendo os parâmetros utilizados para o PP. Verificou-se que esta placa apresentava uma estrutura heterogénea, como se pode constatar na Figura 53.



Figura 53 Placa 1.

Tentando contrariar este facto, tentou-se inicialmente alterar a temperatura dos pratos. Foi testado um valor superior (230 °C) e um valor inferior (190 °C). As placas produzidas com estas temperaturas mantiveram este problema. Produziram-se de seguida placas alterando para valores superiores e inferiores (em relação à primeira) os tempos em que as placas sofrem aquecimento. Os resultados foram os mesmos. Produziram-se também placas com valores superiores e inferiores de pressão e o resultado manteve-se. Variou-se ainda o tempo de arrefecimento, retirando as placas com temperaturas superiores a 80 °C e inferiores a este valor. Para além do empenamento visível em placas com arrefecimento mais curto, as alterações não eram muito visíveis.

Esgotadas as hipóteses de alteração dos parâmetros de processamento, decidiu-se abrir um novo saco de material e moldar com o novo material, esperando que o material utilizado anteriormente contivesse humidade e fosse essa a causa das heterogeneidades. O resultado manteve-se. Tentando explorar ainda o fator humidade (apesar de na ficha técnica do material não existir informação em relação à necessidade de secagem do material), colocou-se material na estufa a 40 °C durante cerca de 12 horas. Produziram-se placas variando os parâmetros de processamento, tal como anteriormente. As placas produzidas com este material mantinham as heterogeneidades.

Tentando perceber se o problema era do equipamento, uma vez que poderia não estar a registar a temperatura adequadamente, foram produzidas algumas placas na prensa 2 do DEP e observou-se que o problema se mantinha.

Surgiu a ideia de que as partes brancas das placas, visíveis na Figura 53, poderiam ser aglomerados de fibras, o que significaria que os grânulos de material não apresentavam uma boa dispersão das fibras. Para avaliar se era este o caso, foram recolhidas amostras das várias placas, cortando três amostras que apresentavam homogeneidade e três amostras que apresentavam heterogeneidade. Utilizou-se então a técnica de calcinação com o intuito de verificar se a percentagem de fibra em cada uma destas zonas era a indicada pelo fabricante (30 %) e se havia desfasamento entre a percentagem de fibra entre as amostras homogéneas e heterogéneas.

No processo de calcinação registou-se o peso dos cadinhos numa fase inicial, depois pesaram-se os cadinhos contendo as amostras e finalmente registou-se o peso dos conjuntos, depois de um processo de calcinação a 625 °C durante 30 minutos. A Tabela 8 contém os resultados obtidos.

Tabela 8 Pesos obtidos na calcinação.

Tipo	Amostras	Peso do cadinho (g)	Peso conjunto (g)	Peso final (g)	% FV
Homogéneo	1	20.113	20.755	20.308	30.38
	2	18.773	19.583	19.022	30.74
	3	19.224	19.830	19.409	30.53
Heterogéneo	4	19.981	20.810	20.236	30.76
	5	19.674	20.610	19.962	30.77
	6	19.197	20.150	19.487	30.43

Como se pode observar a percentagem de fibra de vidro encontra-se na casa dos 30 % para os dois tipos de amostras. Estes resultados sugerem que a fibra de vidro se encontra bem dispersa e que a quantidade de fibra indicada pelo fabricante para este material está de acordo com os resultados obtidos. Visto isto, decidiu-se cortar os provetes destas placas, utilizando um cortante. O reduzido tamanho dos provetes faz com que seja possível retirar provetes apenas das zonas homogéneas das placas. Desta forma, procurou-se evitar que os resultados dos ensaios de tração fossem afetados pelas heterogeneidades. Este processo de corte de provetes foi semelhante ao utilizado no corte de provetes a partir de placas de PP. Neste estudo os provetes deste tipo têm a seguinte designação: FV/M/COMP.

3.4. Caraterização dos componentes produzidos por FDM

3.4.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram efetuados com uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 4505. Os ensaios realizaram-se utilizando a velocidade de 50 mm/min e distância inicial entre amarras de 25 mm. Foi feita a aquisição de dados a uma taxa de 10 pts/seg. Foram testados 6 provetes de cada tipo, sendo que na análise dos resultados serão apenas considerados os dados referentes a 5 provetes, para permitir, em cada conjunto, a exclusão do que resulta num valor mais afastado em relação ao valor médio do módulo de elasticidade.

3.4.2. Avaliação estética e dimensional

A avaliação estética incidiu nos objetos impressos para avaliação dimensional. Esta avaliação consistiu na observação do acabamento superficial e dos defeitos que apresentavam. Fez-se uma comparação entre os objetos impressos com os dois materiais (PP e GRPP).

A avaliação dimensional incidiu em 7 dimensões (a, b, c, d, e, f, g). Todas as medidas foram determinadas utilizando um paquímetro digital. Na Figura 54 podem-se observar as dimensões avaliadas e respectivos valores nominais.

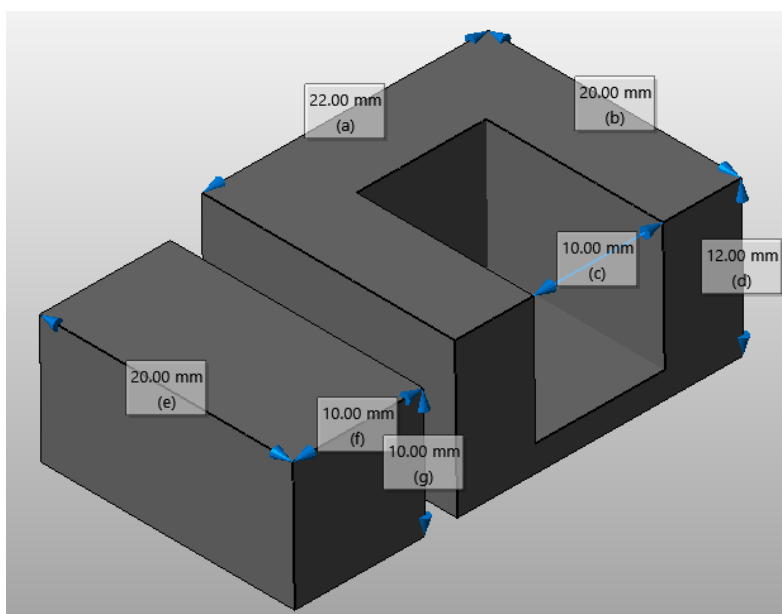


Figura 54 Dimensões avaliadas e valores nominais.

3.4.3. Caracterização morfológica

Foi realizada uma avaliação da superfície de fratura dos provetes construídos por FDM com PP. Utilizou-se um Microscópio de Reflexão (DIC). A aquisição das imagens foi feita com uma máquina digital Leica. O software utilizado foi o Leica Suite. Numa fase inicial procurou-se fazer o estudo utilizando provetes quebrados com recurso a azoto líquido. No entanto, os provetes quebrados nestas condições apresentavam uma superfície de fratura muito irregular. Decidiu-se, por esta razão, utilizar os provetes

resultantes dos ensaios de tração, que apresentavam uma superfície de fratura mais regular. Dado o reduzido alongamento dos provetes em tração, a observação destas superfícies oferece uma boa perspetiva do processo de construção dos provetes.

Com este estudo procurou-se analisar a meso estrutura dos provetes construídos em FDM com PP.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Ensaios de tração

Na Figura 55 pode ver-se o modo de falha para cada tipo de provete.

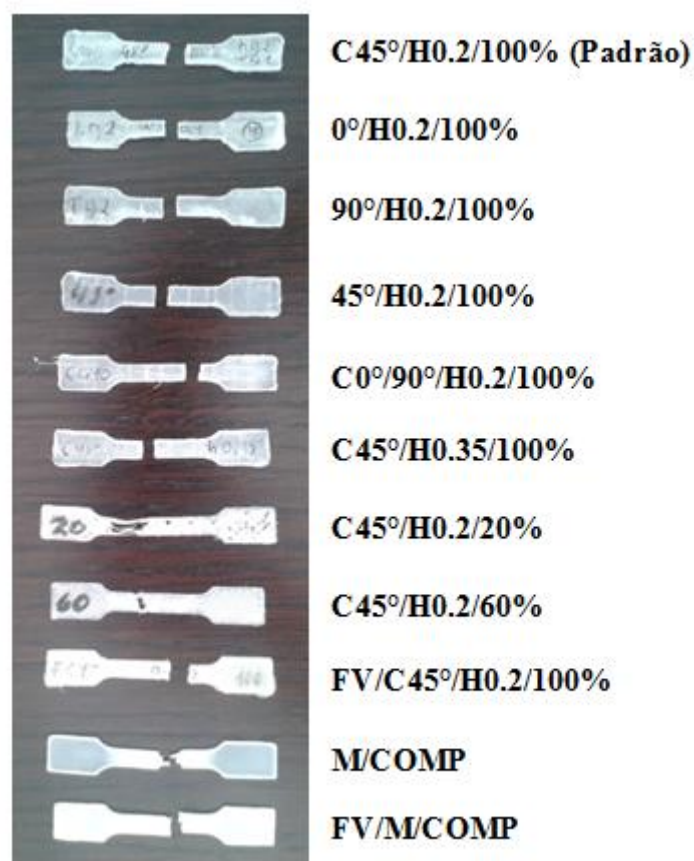
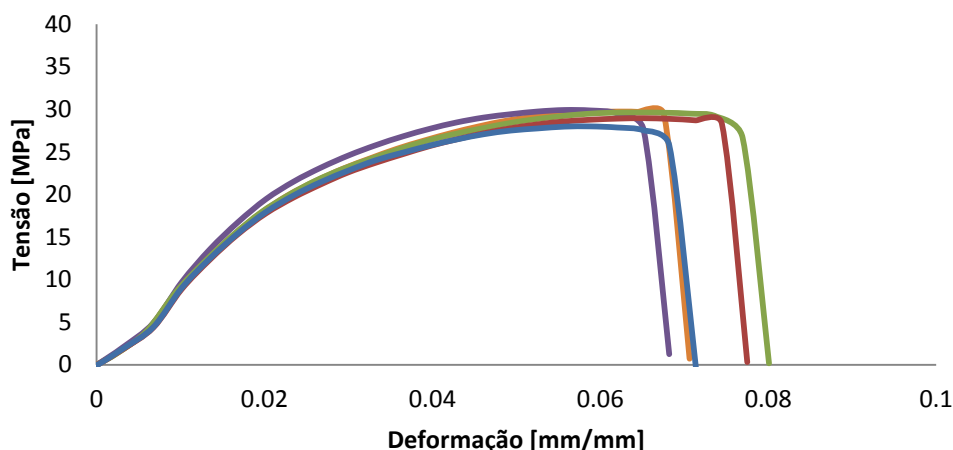


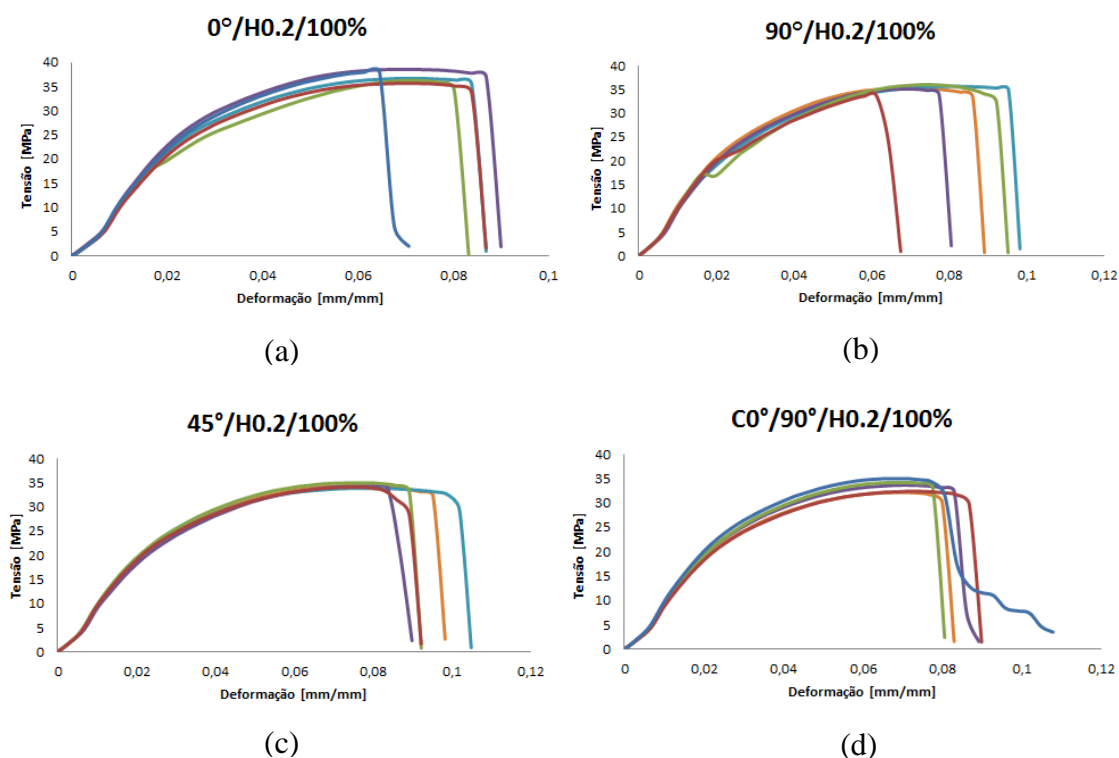
Figura 55 Modos de falha dos vários tipos de provetes.

No caso dos provetes destinados a avaliar o grau de enchimento (C45°/H0.2/20% e C45°/H0.2/60%), nestes não chega a acontecer a separação total entre metades dos provetes. Isto deve-se à presença do perímetro externo. A máquina de ensaios de tração termina o ensaio antes de ocorrer a separação total, uma vez que, dada a baixa força necessária para tracionar apenas esse perímetro externo, esta assume que o ensaio terminou.

Para cada tipo de provetes foi gerado um gráfico com as curvas de tensão-deformação. Na Figura 56 podem ver-se estas curvas para os provetes padrão.

C45°/H0.2/100% (Padrão)**Figura 56** Curvas tensão-deformação (Padrão).

Na Figura 57 encontram-se os gráficos que incluem as curvas de tensão-deformação dos provetes construídos com o objetivo de avaliar os efeitos da orientação de deposição nas propriedades mecânicas.

**Figura 57** Curvas tensão-deformação das orientações (a) 0°, (b) 90°, (c) 45°, (d) 0°/90°.

Através da análise dos gráficos é possível constatar que os valores de tensão e deformação são muito semelhantes para todas as orientações. Para cada uma das curvas foi calculado o módulo de elasticidade e registado o valor da tensão máxima. Nas Figuras 58 e 59 pode ver-se uma comparação entre os vários tipos de provetes construídos para avaliar o efeito da orientação de deposição, em termos dos valores médios de módulo de elasticidade e tensão máxima.

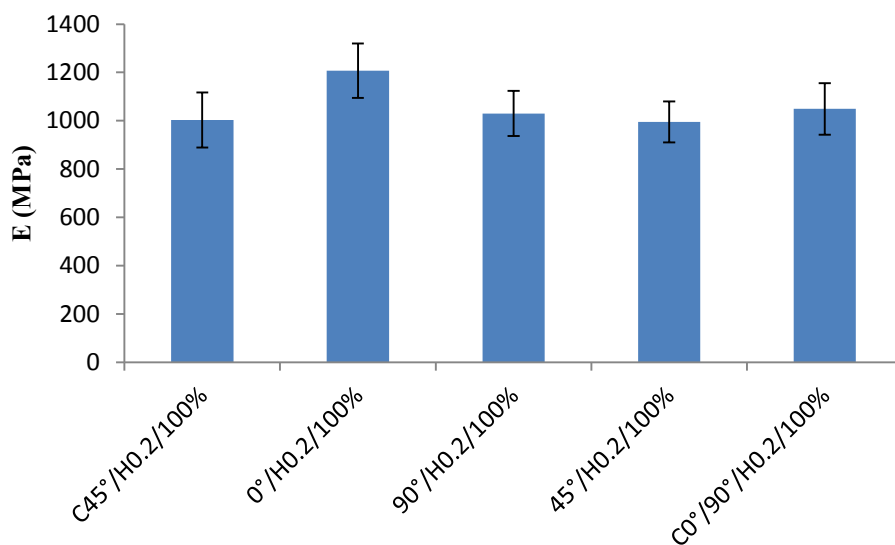


Figura 58 Módulo de elasticidade (estudo da orientação).

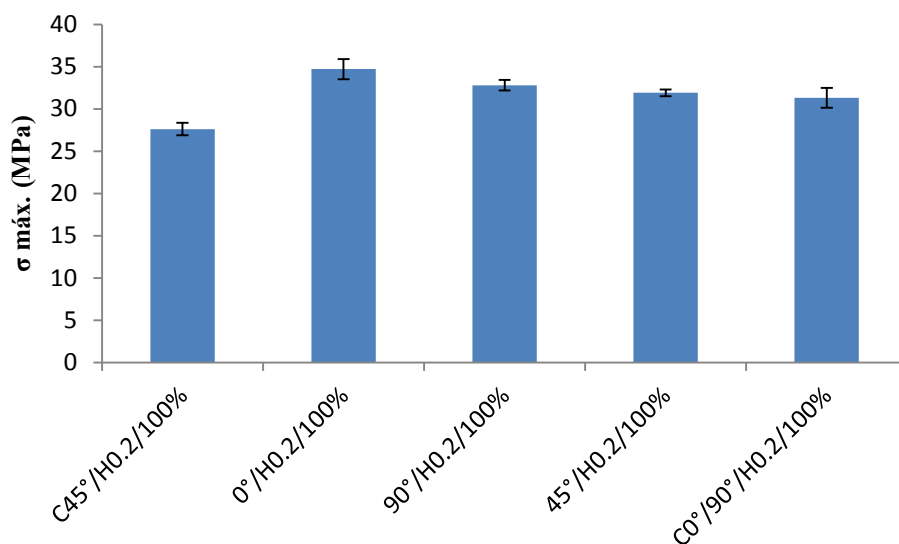


Figura 59 Tensão máxima (estudo da orientação).

Os resultados obtidos sugerem que a melhor orientação de deposição em termos de resistência à tração é a orientação de 0° , que representa uma deposição longitudinal. Os provetes padrão apresentaram 83 % do valor do módulo de elasticidade dos provetes de 0° . Seria de esperar que os provetes construídos com a orientação de 90° fossem os menos resistentes, de acordo com os resultados obtidos em estudos anteriores, com outros materiais. No entanto isso não se verificou, uma vez que estes obtiveram 85 % do valor do módulo de elasticidade dos provetes de 0° , o que pode estar relacionado com a adesão entre filamentos. Quando se traciona um provete deste tipo está-se a avaliar sobretudo a adesão entre filamentos e como neste caso a resistência à tração foi elevada, a adesão entre filamentos é certamente, de boa qualidade. Esta questão pode ser respondida através da análise dos resultados da avaliação morfológica. Os provetes com orientação de 45° e $0^\circ/90^\circ$ obtiveram valores de módulo de elasticidade de 82 % e 87 %, respetivamente (em relação aos provetes com orientação de 0°). A proximidade dos resultados das orientações testadas, principalmente naquelas em que a adesão entre filamentos é um fator decisivo, é também um indício forte de que a adesão entre filamentos é forte, o que se repercute em provetes compactos, com reduzido espaçamento entre filamentos.

Relativamente à avaliação do efeito da altura da camada, podem ver-se na Figura 60 as curvas tensão-deformação dos provetes tracionados respeitantes a construções com altura de camada de 0.35 mm.

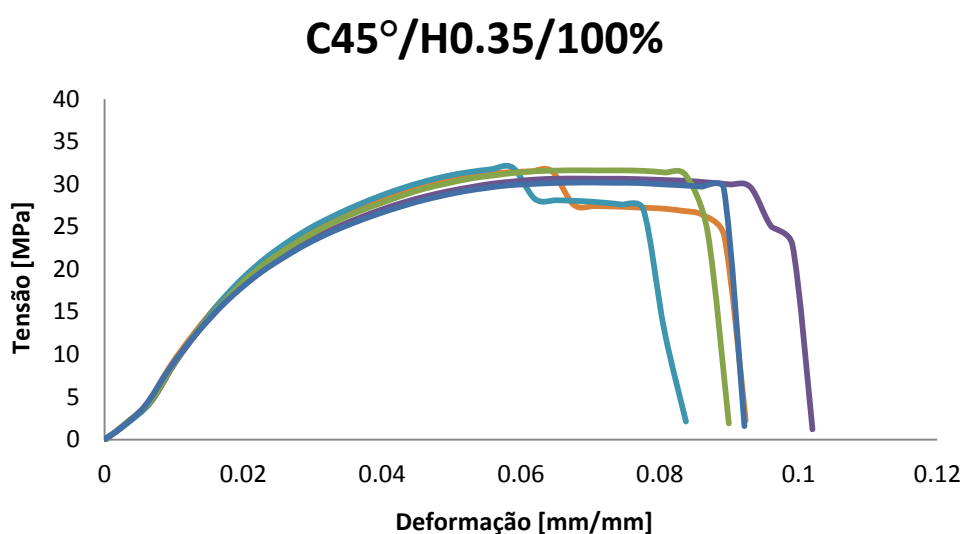


Figura 60 Curvas tensão-deformação (C45°/H0.35/100%).

Algumas destas curvas apresentam uma irregularidade, comparando com as outras curvas do mesmo tipo e até com curvas de outros tipos. Este desnível observado nas curvas laranja e azul claro do gráfico anterior deveu-se a uma fraca adesão entre a primeira e a segunda camada dos provetes. Este facto fez com que a primeira camada sofresse rutura num momento anterior ao das restantes camadas.

Pela análise dos gráficos representados nas Figuras 61 e 62 é possível verificar que não existem diferenças substanciais, em termos de resistência mecânica, entre os dois tipos de provetes. No entanto, os provetes construídos com altura de camada de 0.35 mm obtiveram os melhores resultados. O valor médio de módulo de elasticidade dos provetes padrão (com altura de camada de 0.2 mm) foi 98.5 % do registado pelos provetes com altura de camada de 0.35 mm. Em relação à tensão máxima, este valor cifrou-se nos 94 %.

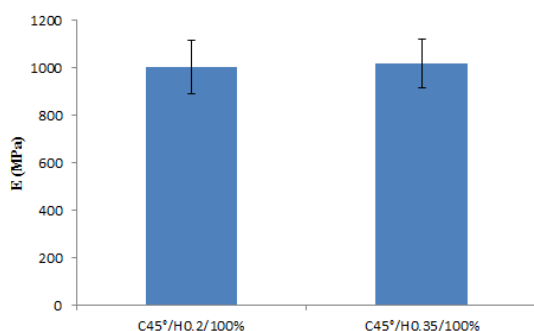


Figura 61 Módulo de elasticidade (estudo da altura da camada).

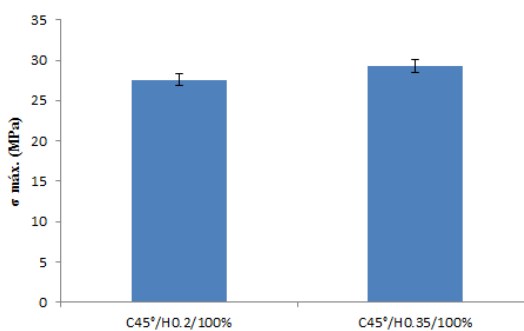


Figura 62 Tensão máxima (estudo da altura da camada).

Em relação à avaliação do efeito do grau de enchimento, na Figura 63 encontram-se as curvas relativas aos dois graus de enchimento restantes.

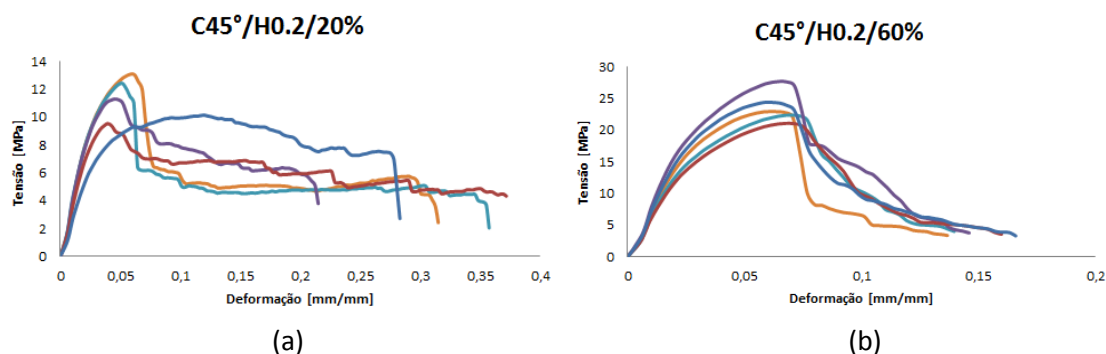


Figura 63 Curvas tensão-deformação para os enchimentos de 20 % (a) e 60 % (b).

As curvas respeitantes a provetes com graus de enchimento inferiores a 100 % mostram que para estes foram obtidos valores de deformação mais elevados antes da rutura, sendo que para os enchimentos testados, o de 20 % resultou na maior deformação.

Os valores de módulo de elasticidade e tensão máxima médios foram mais elevados para o enchimento de 100 %, seguido do enchimento de 60 % e finalmente o enchimento de 20 %, tal como se pode observar nas Figuras 64 e 65.

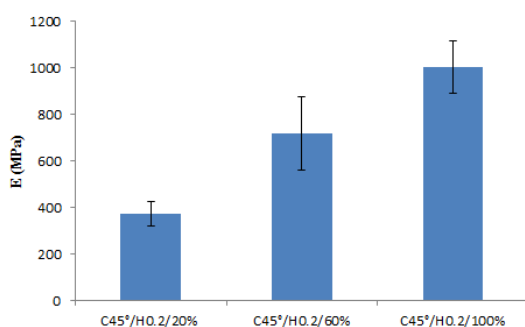


Figura 64 Módulo de elasticidade (estudo do enchimento).

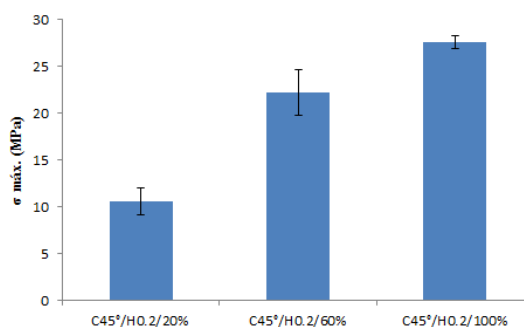


Figura 65 Tensão máxima (estudo do enchimento).

Estes resultados sugerem que existe correlação linear entre os vários graus de enchimento. De forma a avaliar esta hipótese, foram realizadas regressões lineares para os dados referentes aos valores médios de módulo de elasticidade e tensão máxima. As retas de regressão linear correspondentes podem ver-se nas Figuras 66 e 67.

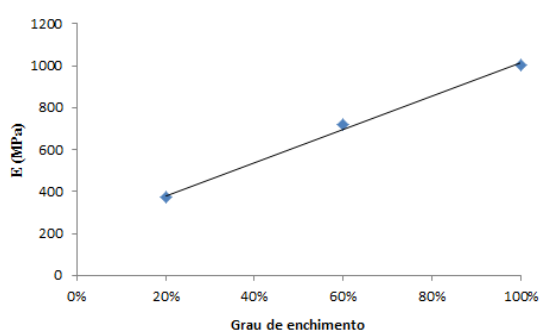


Figura 66 Regressão linear (módulo de elasticidade).

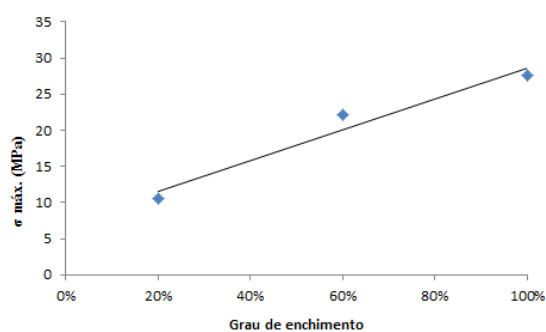


Figura 67 Regressão linear (tensão máxima).

O grau de linearidade foi avaliado através do cálculo do coeficiente de Pearson. Para os resultados do módulo de elasticidade, o valor do coeficiente de Pearson foi de 0.999 e para os resultados de tensão máxima foi de 0.979; como estes valores são muito próximos de 1, pode-se afirmar que existe uma correlação linear positiva forte.

As percentagens dos valores médios de módulo e tensão máxima dos enchimentos inferiores, em relação ao enchimento de 100 %, mostram que graus de enchimento de 20 % proporcionam propriedades mecânicas na ordem dos 40 % e graus de enchimento de 60 % permitem propriedades mecânicas perto dos 80 %. Tal está patente na Figura 68.

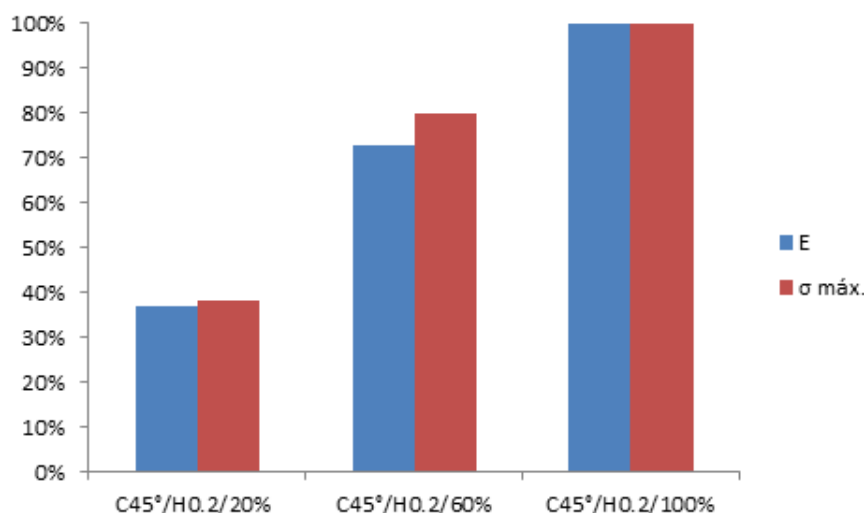


Figura 68 Relação percentual do módulo e tensão máx. (enchimento).

A avaliação do efeito da adição de reforços (fibras de vidro) baseou-se na comparação dos resultados dos ensaios mecânicos obtidos pelos provetes padrão e pelos provetes construídos com GRPP. As curvas de tensão-deformação para os provetes reforçados encontram-se na Figura 69.

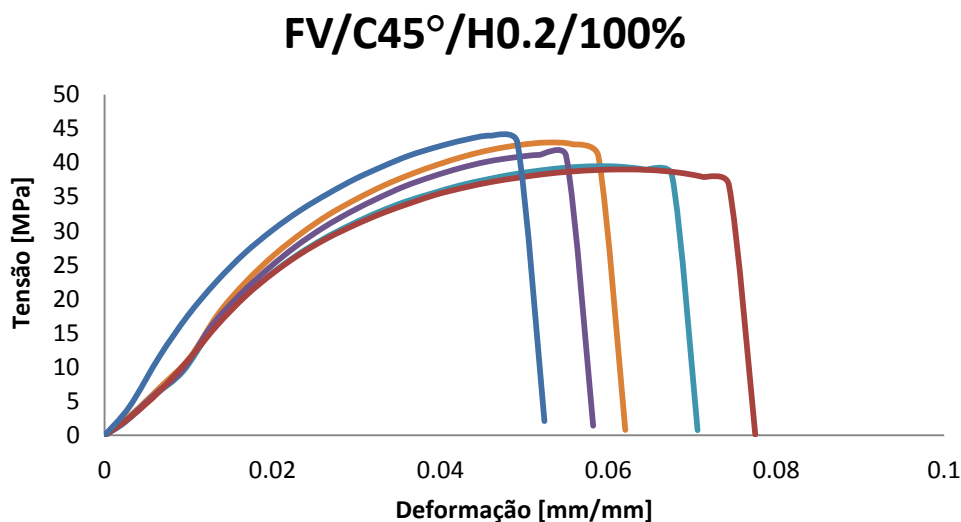


Figura 69 Curvas tensão-deformação (FV/C45°/H0.2/100%).

Quanto à comparação entre valores médios de módulo de elasticidade e tensão máxima, verificou-se que os provetes reforçados apresentam a melhor resistência à tração, com base nos valores mais elevados de módulo e tensão máxima. Os provetes com PP obtiveram 74 % do módulo de elasticidade e 70 % da tensão máxima, em relação aos provetes com GRPP, de acordo com os resultados patentes nas Figuras 70 e 71.

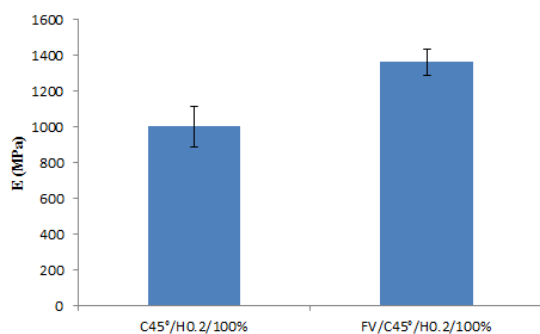


Figura 70 Módulo de elasticidade (estudo do efeito dos reforços).

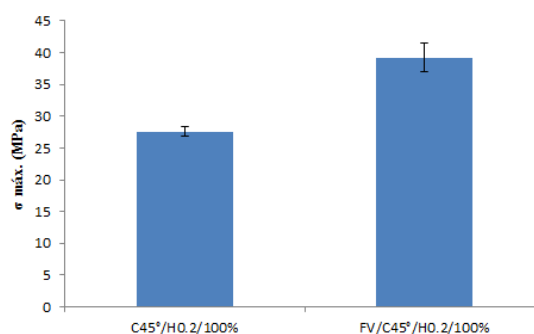


Figura 71 Tensão máxima (estudo do efeito dos reforços).

A apresentação dos resultados referentes aos ensaios de tração fica concluída com a informação referente aos provetes moldados por compressão. Nas Figuras 72 e 73 podem ver-se as curvas tensão-deformação decorrentes dos ensaios de tração dos provetes moldados por compressão com PP e GRPP.

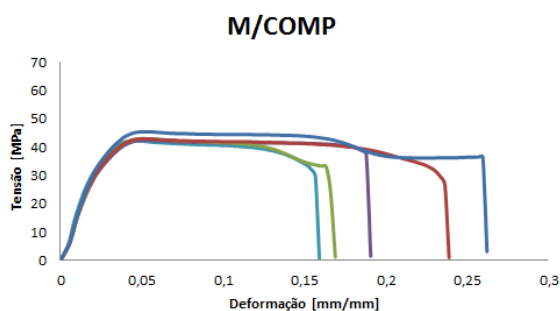


Figura 72 Curvas tensão-deformação (M/COMP).

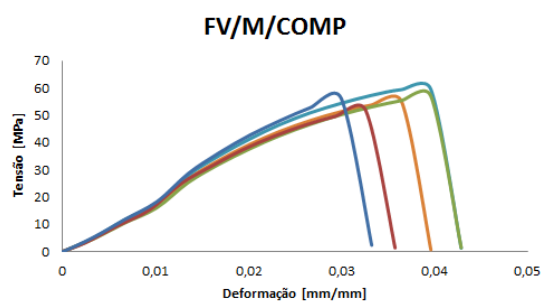


Figura 73 Curvas tensão-deformação (FV/M/COMP).

De acordo com as Figuras 74 e 75, a comparação entre os valores médios de módulo de elasticidade e tensão máxima (com os provetes produzidos por FDM) revela que os provetes moldados por compressão apresentam melhor resistência à tração quando comparados com os seus equivalentes produzidos por FDM. Os provetes com

melhores propriedades mecânicas são os provetes moldados por compressão com GRPP. Verifica-se também que os resultados dos provetes moldados por compressão com PP são semelhantes aos de provetes produzidos por FDM com GRPP. Decorrente deste facto, pode-se concluir que a impressão de provetes com GRPP faz com que as suas propriedades mecânicas (resistência à tração) se aproximem das de provetes moldados por compressão com PP.

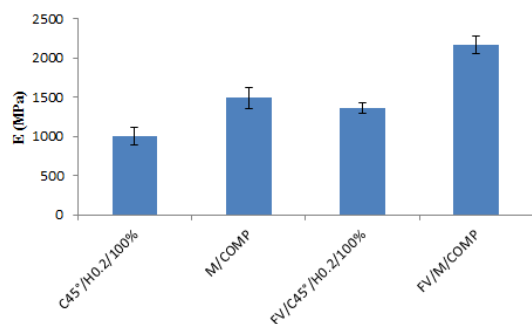


Figura 74 Módulo de elasticidade (estudo das técnicas).

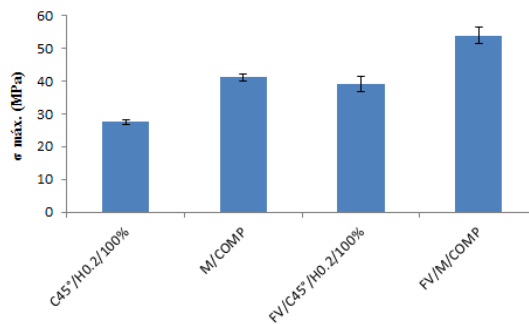


Figura 75 Tensão máxima (estudo das técnicas).

Constata-se também que os provetes padrão, produzidos com PP, têm cerca de 67 % do valor do módulo de elasticidade dos provetes moldados por compressão com o mesmo material. Para o caso dos provetes reforçados, produzidos por FDM, o valor do módulo de elasticidade foi 63 % do valor registado para os provetes moldados por compressão, com o mesmo material. Para o caso da tensão máxima, estes valores são de 67 % e 73 %, respetivamente.

Na Figura 76 pode ver-se uma comparação entre todos os provetes testados.

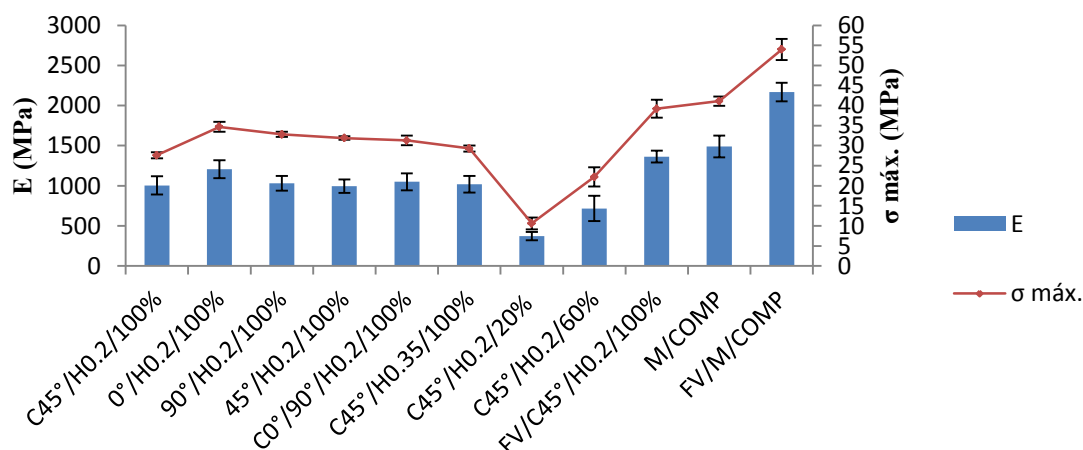


Figura 76 Gráfico comparativo de tensão máxima e módulo de elasticidade.

4.2. Avaliação estética e dimensional

Os conjuntos construídos para avaliação estética e dimensional utilizando os dois materiais em estudo apresentaram algumas diferenças facilmente observáveis. Os conjuntos produzidos com PP (Figura 77) exibiram maior transparência, mas em termos de acabamento, este não foi de tão boa qualidade, uma vez que as superfícies apresentavam algumas irregularidades, aliadas à elevada contração visível pelo encurvamento da base. Este aspeto foi exponenciado pelo facto de se utilizar um enchimento de 100 % nas construções, uma vez que as paredes das peças apresentavam uma elevada espessura. É sabido, pelo observado em técnicas convencionais como a moldação por injeção, que peças com paredes espessas apresentam maior contração do que peças com paredes finas. Outro aspeto importante nos conjuntos de PP é o acabamento da base das peças. Para estas peças, e como a adesão à cama foi muito forte, foi também muito difícil separá-las da cama, o que se repercutiu em superfícies com mau acabamento, em que toda ou parte da 1ª camada depositada se separou delas.



Figura 77 Conjunto construído por FDM com PP.

Os conjuntos construídos com GRPP, tal como se pode observar na Figura 78, caracterizaram-se por um maior detalhe geométrico, mas apresentaram também uma maior heterogeneidade em termos de cores, uma vez que a olho nu é possível distinguir zonas claras e outras visivelmente mais escuras. As zonas escuras dever-se-ão, provavelmente, à existência de sujidade na extrusora aquando da extrusão do filamento.

Esta contaminação foi exponenciada pelo facto do GRPP ser um material mais abrasivo, quando comparando com o PP.

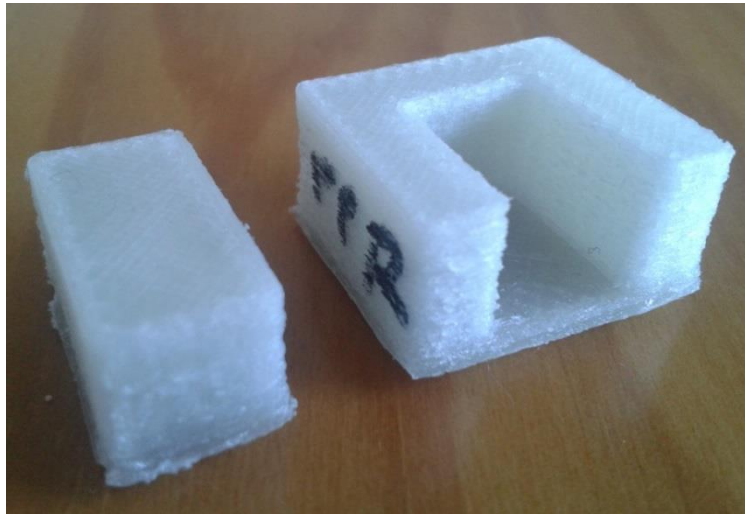


Figura 78 Conjunto construído por FDM com GRPP.

Estes conjuntos foram originalmente concebidos para verificar se as duas peças de cada conjunto encaixavam. Verificou-se que no caso dos conjuntos produzidos com PP, as peças não encaixaram em nenhum dos conjuntos. Já para os conjuntos construídos em GRPP, o encaixe foi possível para todos eles, tal como se pode observar na Figura 79. Este facto é um primeiro indicativo de que dimensionalmente os conjuntos construídos com GRPP estão mais próximos do modelo CAD original.



Figura 79 Conjuntos construídos por FDM com GRPP (montados).

Os resultados das medições para a avaliação dimensional podem ver-se nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 Resultados da avaliação dimensional dos conjuntos de PP.

Dimensões	CAD (mm)	1º (mm)	2º (mm)	3º (mm)	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
a	22	22.35	22.45	22.44	22.42	0.06
b	20	20.21	20.5	20.54	20.42	0.18
c	10	9.31	9.1	9.17	9.19	0.11
d	12	11.95	12.66	11.88	12.16	0.43
e	20	20.2	20.58	20.32	20.37	0.19
f	10	10.2	10.86	10.45	10,50	0.33
g	10	9.75	10.52	9.92	10.06	0.40

Tabela 10 Resultados da avaliação dimensional dos conjuntos de GRPP.

Dimensões	CAD (mm)	1º (mm)	2º (mm)	3º (mm)	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
a	22	22.16	22.19	22.17	22.17	0.02
b	20	20.09	20.11	20.09	20.10	0.01
c	10	9.93	9.9	9.96	9.93	0.03
d	12	11.79	11.86	11.79	11.81	0.04
e	20	20.06	20.12	20.11	20.10	0.03
f	10	10.12	10.18	10.13	10.14	0.03
g	10	9.83	9.88	9.8	9.84	0.04

Através da análise destes dados, criou-se a Tabela 11, que contém os desvios dimensionais para os conjuntos construídos nos dois tipos de material. Constata-se que os desvios superiores e inferiores médios são mais elevados para os conjuntos de PP, revelando que para os conjuntos de PP, as dimensões analisadas se encontravam mais afastadas das equivalentes no modelo CAD. O desvio padrão foi também superior para

o PP, o que demonstra que a repetibilidade do processo não é tão boa quando comparando com o processo de impressão com GRPP.

Tabela 11 Resultados dos desvios dimensionais dos conjuntos.

Desvios	PP	GRPP
Desvio superior médio (mm)	0.321	0.128
Desvio inferior médio (mm)	- 0.807	- 0.140
Desvio padrão (mm)	0.244	0.029

Através da análise do gráfico contido na Figura 80, que abrange os desvios médios para cada dimensão analisada é possível observar que o desvio foi maior, em todas as dimensões, para os conjuntos de PP. Nestes, em todas as dimensões, exceto uma, este desvio implicou dimensões maiores que as do modelo CAD. A única dimensão em que isto não aconteceu refere-se à largura da cavidade em que a peça mais pequena deveria encaixar (c). Isto pode ser explicado pelo facto das dimensões contíguas se encontrarem acima das do modelo CAD, reduzindo assim a largura desta cavidade. O facto desta dimensão se encontrar em média 0.8 mm abaixo do definido pelo modelo CAD, explica em parte, por que razão nos conjuntos de PP, as duas peças não encaixaram. Verificou-se também que a largura das peças pequenas (f), se encontrava 0.5 mm acima do observado no modelo CAD, o que aliado a uma largura (c) mais reduzida da cavidade da peça maior provocou o não encaixe das duas peças. No caso dos conjuntos de GRPP, a largura média das cavidades (desvio de -0.07 mm) foi um pouco inferior à do modelo CAD e a largura média da peça pequena foi um pouco superior (desvio de 0.143 mm), o que proporcionou o encaixe, ainda que com alguma resistência.

Verificou-se também que nas dimensões correspondentes à altura das peças (d e g), onde se esperava que a altura dos conjuntos em PP fosse mais baixa relativamente ao modelo CAD (devido à separação da 1ª camada depositada), isto não se verificou. Este facto é mais uma indicação de que apesar da existência de contração, manifestada pelo encurvamento na base das peças, as dimensões das peças apresentam valores superiores às do modelo CAD. Pelo contrário, nos conjuntos em GRPP as alturas das peças foram

inferiores às do modelo CAD, apesar de nestas não ter sucedido a separação da 1ª camada.

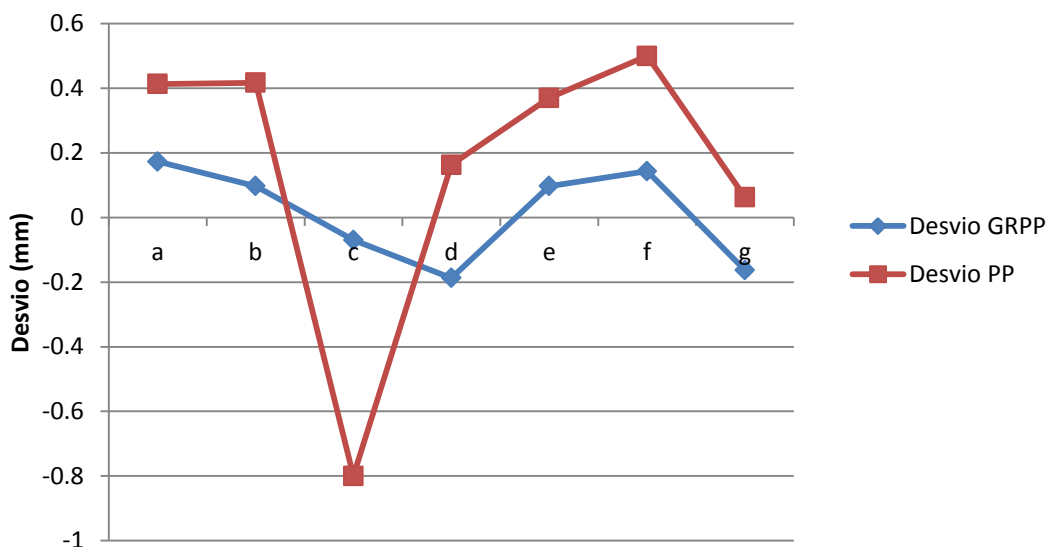


Figura 80 Desvios médios para cada dimensão.

4.3. Caracterização morfológica

Através do uso da técnica de microscopia de reflexão, foi analisada a superfície de fratura de um provete do tipo 0°/H0.2/100%. Foram recolhidas imagens de várias zonas nesta superfície, utilizando focagens distintas para cada uma delas, uma vez que a superfície analisada não representava um corte perfeitamente transversal. Na Figura 81 pode ver-se uma destas imagens, obtida de uma zona mais periférica desta superfície. De referir que na imagem apresentada surgem 8 camadas, das 10 que constituem os provetes. Com uma altura de provetes de 2 mm e altura de camada definida para 0,2 mm, foram necessárias 10 camadas para a construção dos provetes. As duas primeiras (referentes às duas primeiras camadas depositadas) não surgem na imagem, pois não foi possível focá-las no mesmo plano.

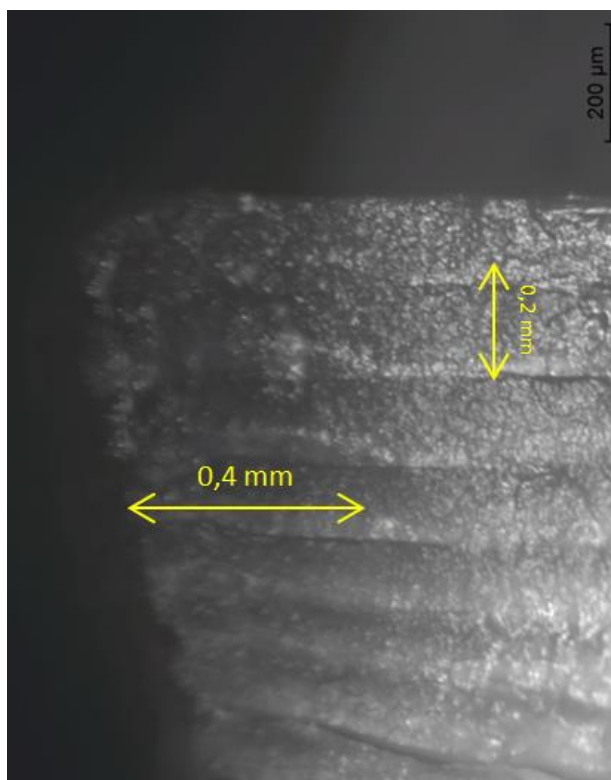


Figura 81 Superfície de fratura (zona 1).

Através da imagem da Figura 81 e com o auxílio das setas a amarelo, é possível constatar que nesta zona a altura das camadas foi inferior à esperada (0.2 mm). Também se pode observar que não é possível distinguir em que zonas se dá a ligação entre filamentos depositados na mesma camada. Para uma largura de filamento definida em 0.4 mm, a zona de ligação entre filamentos estará provavelmente no extremo da seta maior da Figura 81. Este último facto reforça a ideia de que as ligações entre filamentos são de boa qualidade, o que explica a semelhança do comportamento mecânico dos vários provetes construídos para avaliar o efeito da orientação. Os resultados obtidos, especialmente pelos provetes do tipo 90°/H0.2/100%, foram muito semelhantes aos resultados dos restantes provetes destinados a avaliar o efeito da orientação, o que só por si já sugeria que os filamentos estivessem bem empacotados, originando um sólido compacto. Isto foi agora confirmado pela caracterização morfológica.

As imagens de microscopia referentes a duas outras zonas da superfície de fratura do provete encontram-se na Figura 82. Nestas imagens é possível observar uma zona intermédia (zona 2) e uma zona periférica (zona 3, do lado oposto à zona 1).

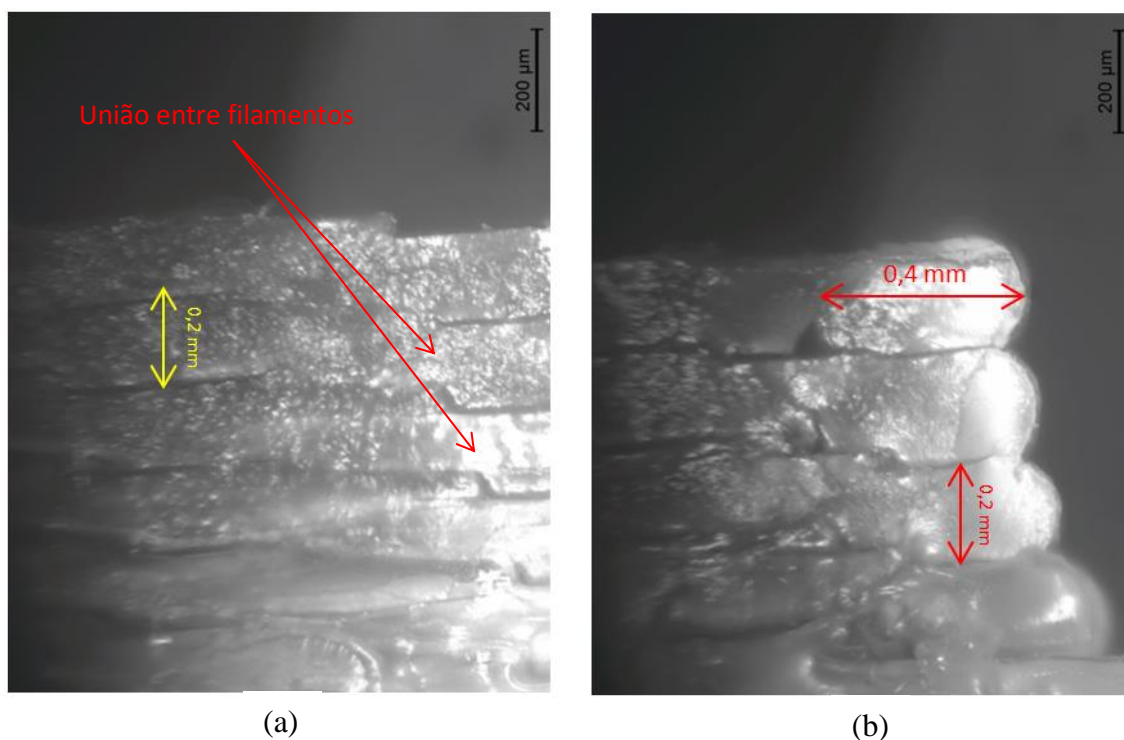


Figura 82 Superfície de fratura para (a) zona 2, (b) zona 3.

Na zona 2 a altura das camadas é também inferior a 0.2 mm e continua a não ser possível identificar individualmente os filamentos depositados. No entanto, verifica-se que a união entre filamentos não é tão regular como na zona 1, existindo algum desfasamento vertical na união entre estes. Na zona 3, é possível identificar individualmente alguns filamentos e assim verificar que a largura dos mesmos corresponde ao valor desejado, definido no software Slic3r. A altura da camada nesta zona é de 0.2 mm, tal como definido no software. Na zona 3 é possível observar também que a união entre filamentos apresenta alguma folga, não sendo possível perceber se este afastamento aconteceu aquando da construção dos provetes ou se é resultado dos ensaios de tração.

Da análise das 3 zonas pode-se constatar que a adesão entre filamentos é regra geral de boa qualidade, parecendo não existir vazios entre eles, sendo que nalgumas zonas não é possível sequer identificar a posição destas ligações. Em resultado disto, os provetes construídos com PP apresentam uma construção compacta. É por este motivo que não existem diferenças substanciais nas propriedades mecânicas (resistência à tração) dos provetes construídos com as mais diversas orientações.

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O objetivo principal desta tese era o estudo da técnica FDM desde a produção dos filamentos até ao fabrico dos produtos finais, numa perspetiva de entender quais as suas vantagens e limitações em relação a técnicas convencionais. Este objetivo foi atingido na plenitude.

A extrusão do filamento foi relativamente semelhante para os dois materiais, em termos de disposição dos equipamentos na linha de extrusão. Em ambos se utilizou arrefecimento a ar e foi utilizada apenas uma unidade de puxo. A principal diferença residiu na inserção de um dispositivo de contato que prevenia a rutura do filamento, na extrusão do filamento reforçado. Em termos de janela operatória, para cada um dos materiais, foi definida uma janela operatória distinta. A informação recolhida sobre a produção dos filamentos permite que se possa repetir o processo facilmente.

Os filamentos foram testados em FDM. Definiram-se as condições ótimas para a impressão com os dois filamentos. O filamento de PP tornou mais difícil o seu processamento, principalmente pela fraca adesão a diversos tipos de camas testadas. Concluiu-se que a impressão com PP é otimizada com camas fabricadas com o mesmo material, moldadas por compressão. Para este material é importante referir também que não se deve aquecer a cama e a velocidade de deposição da 1ª camada deve ser baixa (8 mm/s), enquanto a velocidade para as outras camadas pode ser de 60 mm/s. Na impressão com GRPP podem ser utilizados dois tipos de camas (placa de PP e vidro com fita de pintura) e deve-se aquecer a mesma a 80 °C, quando se utiliza a cama de vidro com fita de pintura. A velocidade de deposição deve ser baixa (8 mm/s) durante toda a construção para evitar o entupimento do bico.

Da caracterização das amostras concluiu-se que a resistência à tração foi maior para os provetes com deposição longitudinal, ainda que os valores fossem muito semelhantes. Maiores graus de enchimento proporcionaram também melhor resistência à tração, existindo correlação linear positiva forte entre os valores de módulo e tensão máxima, para os três graus de enchimento. Graus de enchimento de 20 % proporcionaram propriedades mecânicas na ordem dos 40 % e graus de enchimento de 60 % permitiram propriedades mecânicas na casa dos 80 %, em relação a enchimentos de 100 %. Uma maior altura da camada nas construções aumentou ligeiramente a resistência à tração, sendo que o módulo de elasticidade dos provetes construídos com

altura da camada de 0.2 mm (mais baixa) foi 98.5 % do obtido para os provetes com altura da camada de 0.35 mm. O módulo de elasticidade dos provetes de FDM com PP foi 74 % dos valores registados para os provetes reforçados. Os provetes de FDM com PP apresentaram 67 % do valor do módulo de elasticidade dos provetes moldados por compressão, no caso do GRPP este valor foi de 63%. De referir que os provetes moldados por compressão em PP obtiveram resultados muito semelhantes aos provetes de FDM com GRPP.

Através da caracterização morfológica foi possível perceber que as ligações entre filamentos são de boa qualidade, o que explica a pouca diferença entre as várias orientações em termos de resistência à tração. Dimensionalmente, os objetos em GRPP apresentaram os melhores resultados. Em termos estéticos, os objetos em PP apresentaram elevada transparência, mas maior irregularidade superficial. Os objetos em GRPP eram opacos e apresentavam zonas esbranquiçadas e outras enegrecidas (devido a sujidade na extrusora).

Deste estudo conclui-se que o PP é um material algo difícil de ser processado em FDM, devido à sua elevada contração e baixa adesão à maioria das superfícies. Para além disso, as peças produzidas com este material não apresentam uma boa estabilidade dimensional e a resistência à tração é significativamente inferior à de peças produzidas por moldação por compressão. São necessários estudos para melhorar os fatores adesão e contração, de forma a tornar este material mais apelativo para uso em FDM. Seria importante estudar o efeito que terá na estabilidade dimensional a variação dos graus de enchimento na impressão com este material. Também seria útil estudar novas superfícies para cama, uma vez que com a superfície utilizada neste estudo, a adesão era demasiado forte, o que dificultava a separação dos objetos e danificava os mesmos.

O PP reforçado com 30 % de fibras de vidro revelou-se um material com mais potencial para se utilizar em FDM, uma vez que apresenta uma boa adesão a dois tipos de camas e os objetos apresentam uma boa estabilidade dimensional. Em termos de resistência à tração, este material é melhor que o PP não reforçado, como seria de esperar. Importante também, é o facto de não ter sido possível processar este material com velocidades mais elevadas, o que faz com que as impressões demorem demasiado tempo, quando comparado com outros materiais, comprometendo o seu uso para maiores séries de produção. É necessário estudar estratégias que possibilitem a impressão deste material com maiores velocidades de deposição.

O estudo do uso de materiais semi-cristalinos em FDM é uma área ainda pouco explorada. O uso da técnica de FDM para a obtenção de produtos finais poderia ser alargado se se aumentasse a gama de materiais disponíveis, o que potencialmente aconteceria com a realização de mais estudos com materiais semi-cristalinos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Custompartnet. (2008). Additive Fabrication. [Em linha]. Disponível em: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>. [consultado em 22-05-2014].
- [2] R. W. G. IV, D. G. Baird, and J. H. Bøhn, “Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 14–25, Jan. 1998.
- [3] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, and Z. Li, “Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 301, no. 2, pp. 125–130, 2001.
- [4] M. L. Shofner, K. Lozano, F. J. Rodríguez-Macías, and E. V. Barrera, “Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, no. 11, pp. 3081–3090, Sep. 2003.
- [5] J. F. Rodríguez, J. P. Thomas, and J. E. Renaud, “Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 148–158, Jan. 2001.
- [6] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, 2002.
- [7] K. C. Ang, K. F. Leong, C. K. Chua, and M. Chandrasekaran, “Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 100–105, Jan. 2006.
- [8] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 72–80, Mar. 2008.
- [9] R. Ilardo and C. B. Williams, “Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 16, no. 3, pp. 174–179, Apr. 2010.
- [10] E. L. Melgoza, G. Vallicrosa, L. Serenó, J. Ciurana, and C. A. Rodríguez, “Rapid tooling using 3D printing system for manufacturing of customized tracheal stent,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 1, pp. 2–12, Jan. 2013.

- [11] Q-tec gmbh. (N.D.). Produkte. [Em linha]. Disponível em: <http://www.q-tec-gmbh.de/de/produkte/pruefgeraete/pruefkoerper/stanzmesser/din64504-s3a/index.html>. [consultado em 15-04-2014].
- [12] Repsol. (2013). Catálogo. [Em linha]. Disponível em: http://www.repsol.com/sa/herramientas/CatalogoQuimica/TransFichero.aspx?ruta=&archivo=PP040C1E_EX&tipo=NT. [consultado em 05-03-2014].
- [13] SOFTER. (2006). Catálogo. [Em linha]. Disponível em: <http://www.softergroup.com/en/products/EngineeringThermoplastics/Polifor/details?productid=27¯ode=Engineering-Thermoplastics&prdName=Polifor>. [consultado em 07-03-2014].

Anexo I Ficha técnica do material: ISPLEN PP 040 C1E (PP)

Isplen® Polypropylene

Chemicals

Technical data sheet

**ISPLEN® PP040C1E****DESCRIPTION**

ISPLEN® PP040C1E is a medium melt flow rate homopolymer specially formulated and adapted for extrusion processes and particularly in thermoforming due to its high transparency and high stiffness.

It is nucleated and the properties remain even at high regrind fractions. This makes the grade recommendable in barrier sheet packing application.

APPLICATIONS

In extrusion processes such as:

- Mainly in sheet extrusion and thermoforming.
- Coextrusion in rigid packaging.
- Others are monofilament and weaving tapes.

Recommended melt temperature range from 190 to 250°C. Processing conditions should be optimised for each production line.

PROPERTIES	VALUE	UNIT	TEST METHOD
General			
Melt flow rate (230°C/2.16 kg)	3.0	g/10 min	ISO 1133
Density at 23°C	905	kg/m ³	ISO 1183
Mechanical			
Flexural modulus	1,800	MPa	ISO 178
Charpy impact strength (23°C, notched)	3.5	kJ/m ²	ISO 179
Thermal			
Vicat softening temperature A120 (10 N)	153	°C	ISO 306
HDT 0.45MPa	90	°C	ISO 75
Others			
Haze (1 mm)	21	%	ASTM D 1003

ISPLEN® PP040C1E complies with the European Directives regarding materials intended for contact with foodstuffs. For further information, please contact our Technical Service and Development Laboratory or our Customer Care Service.

STORAGE

ISPLEN® PP040C1E should be stored in a dry atmosphere, on a paved, drained and not flooded area, at temperatures under 60°C and protected from UV radiation. Storage under inappropriate conditions could initiate degradation processes which may have a negative influence on the processability and the properties of the transformed product.

November 2013

This information is offered to good faith and meant only as a guide. The transformer or user will be, in each case, responsible for the process efficiency and the final use of the product. Avoidance under patents, copyright and registered designs cannot be assumed.

Technical service and development:
Repsol Technology Centre
Ctra. de Engenheiros, 45, 28018
Madrid, Madrid, Spain
Tel: +34 91 458 45 00
info@repsol.com

Headquarters:
Méndez Álvaro, 45
28045 Madrid
Spain
www.chemicals.repsol.com

Customer Care:
sac@repsol.com

Figura 83 Ficha técnica do material: ISPLEN PP 040 C1E [12].

Anexo II Ficha técnica do material: POLIFOR L6GF/30 NATURALE (GRPP)

So.F.TER.

TECHNICAL DATA SHEET

POLIFOR L6 GF/30 NATURALE

POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER 30% GLASS FIBER REINFORCED CHEMICALLY COUPLED

PROPRIETA'	Method	Unit	Typical Values	PROPERTIES
FISICHE				PHYSICAL
Densità (23°C)	ASTM D1505	g/cm ³	1,13	Density (23°C)
Ritiro allo stampaggio	INTERNAL	%	0,2+0,4	Mould Shrinkage
Melt flow index 230 °C/2,16KG	ASTM D1238	g/10min	2,5	Melt flow index 230 °C/2,16KG
Assorbimento all'equilibrio (50% UR • 23°C)	ISO 62	%	-	Humidity absorption at equilibrium (50% RH • 23°C)
MECCANICHE				MECHANICAL
Carico a snervamento a trazione	ASTM D638	MPa	90	Tensile strength at yield
Carico a rottura a trazione	ASTM D638	MPa	-	Tensile strength at break
Allungamento a rottura a trazione	ASTM D638	%	3	Tensile elongation at break
Modulo a trazione	ASTM D638	MPa	-	Tensile Modulus
Modulo a flessione	ASTM D790	MPa	5500	Flexural Modulus
IZOD, con intaglio (23°C)	ASTM D256	J/m	100	IZOD Impact strength, notched (23°C)
Charpy, con intaglio (23°C)	ISO 179 1eA	KJ/m ²	-	Charpy Impact strength, notched (23°C)
TERMICHE				THERMAL
Vicat B (50°C/h • 50 N)	ASTM D1525	°C	135	Vicat B (50°C/h • 50 N)
HDT (1,820 MPa)	ASTM D648	°C	-	HDT (1,820 MPa)
Test della biglia	IEC 335	°C	125	Ball pressure test
RESISTENZA ALLA FIAMMA				FLAME RESISTANCE
Indice di ossigeno (LOI)	ASTM D2863	%	-	Oxygen Index (LOI)
Resistenza alla fiamma (0,8 mm)	UL94	Class	-	Flame resistance (0,8 mm)
Resistenza alla fiamma (1,6 mm)	UL94	Class	HB	Flame resistance (1,6 mm)
Resistenza alla fiamma (3,2 mm)	UL94	Class	HB	Flame resistance (3,2 mm)
Ago ipodermico	IEC 695-2-2	-	-	Needle Flame test
Glow-wire Flammability Index (GWFI)	IEC 695-2-12	°C / mm	-	Glow-wire Flammability Index (GWFI)
Glow-wire Ignition Temperature (GWIT)	IEC 695-2-13	°C / mm	-	Glow-wire Ignition Temperature (GWIT)
Correnti striscianti (CTI) (Soluzione A)	IEC 112	VOLT	-	Comparative tracking index (CTI) (Solution A)
CONDIZIONI DI PROCESSO				PROCESSING CONDITIONS
Temperatura del cilindro	-	°C	190+230	Cylinder temperature
Temperatura dello stampo	-	°C	50+70	Mould temperature
Condizioni di essiccazione	-	hours - °C	-	Drying process

Note :

QUALITY ASSURANCE

Last update 08/11/2006

Test effettuati a 23°C salvo diversamente specificato.
I dati riportati si intendono indicativi e non costituiscono specifica

Test temperatures : 23°C, unless otherwise stated
The values are to be considered typical and do not constitute a specification

SO.F.TER. SPA Granulati Termoplastici
via Mastro Giorgio, 1 • Z.I. Villa Selva • I-47100, FORLÌ, ITALY

TEL. +39 0543 790 411 softer@softerspa.com
FAX +39 0543 473 119 www.softerspa.com

Figura 84 Ficha técnica do material: POLIFOR L6GF/30 NATURALE [13].

Anexo III Especificações da impressora Prusa I3**Tabela 12** Especificações da impressora Prusa I3.

Tamanho máximo de impressão	20 x 20 x 20 cm (LxCxA)
Dimensões da impressora	43 x 43 x 37 cm (LxCxA)
Diâmetro do nozzle	0.4 mm
Diâmetro do filamento	1.75 mm
Espessura mínima aconselhada de camada	0,15mm
Velocidade máxima aconselhada	100 mm/s
Consumo eléctrico (max)	240 W
Software (recomendado)	Slic3r + Pronterface (open source)
Firmware	Arduino/Marlin